



**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
στις Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Τεχνολογίες**

**Τμήμα Φυσικής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ (Μ.Δ.Ε)

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ PCB ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΜΗΧΑΝΗΣ CNC**

ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΣΙΝΤΟΥ

Αριθμός μητρώου: 878

Επιβλέπων καθηγητής: ΤΣΙΑΤΟΥΧΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**Ιωάννινα
Απρίλιος 2026**

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζει τη διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) με τη χρήση σύγχρονων εργαλειομηχανών CNC, εστιάζοντας στην επιτραπέζια φρέζα Wegstr. Στο πλαίσιο του σύγχρονου βιομηχανικού περιβάλλοντος, η ανάγκη για ταχεία και ακριβή πρωτοτυποποίηση ηλεκτρονικών συστημάτων καθίσταται επιτακτική. Η εργασία αναλύει τη θεωρητική βάση των συστημάτων CAD/CAM/CAE και την αρχιτεκτονική των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου, ενώ επικεντρώνεται στην πρακτική εφαρμογή τους στο Εργαστήριο VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει την πλήρη ροή σχεδίασης, από τη σχηματική απεικόνιση με το λογισμικό EasyEDA Pro έως την επεξεργασία και παραγωγή κώδικα μηχανής (G-Code) μέσω του FlatCAM. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας τεκμηριώνεται μέσα από την υλοποίηση ενός βαθυπερατού φίλτρου Butterworth, όπου εξετάζονται οι παράμετροι κοπής, η διαχείριση των εργαλείων και η ακρίβεια της μηχανικής κατεργασίας σε πλακέτες μονής και διπλής όψεως. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη μηχανή Wegstr ως ένα αξιόπιστο εργαλείο για την έρευνα και την παραγωγή πρότυπων συστημάτων υψηλής ποιότητας, προσφέροντας παράλληλα οδηγίες για τη συντήρηση και την ασφαλή λειτουργία του εξοπλισμού.

Abstract

This master's thesis explores the design and manufacturing process of Printed Circuit Boards (PCBs) using modern CNC machine tools, focusing on the Wegstr desktop milling machine. Within the context of the contemporary industrial environment, the need for rapid and precise prototyping of electronic systems has become imperative. The thesis analyzes the theoretical foundation of CAD/CAM/CAE systems and the architecture of numerical control machine tools, focusing on their practical application at the VLSI and Computer Architecture Laboratory (VCAS).

The methodology followed encompasses the complete design workflow, from schematic capture in EasyEDA Pro software to the processing and generation of machine code (G-Code) via FlatCAM. The effectiveness of the proposed process is documented through the implementation of a Butterworth low-pass filter, where cutting parameters, tool management, and machining precision on single and double-sided boards are examined. The results highlight the Wegstr machine as a reliable tool for research and high-quality prototyping, while also providing guidelines for the maintenance and safe operation of the equipment.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελίδα
Περίληψη	1
Abstract	2
Περιεχόμενα	3
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	5
Κεφάλαιο 2: Μηχανολογικός Σχεδιασμός	7
2.1 Το Σύγχρονο Βιομηχανικό Περιβάλλον	7
2.2 Ορισμός Σχεδιομελέτης και Παραγωγής Με Χρήση Υπολογιστή	8
2.3 Εξέλιξη των Λογισμικών CAD/CAM/CAE	9
2.4 Μελλοντικές Προοπτικές	10
2.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	11
Κεφάλαιο 3: Εργαλειομηχανές (Φρέζες) CNC	12
3.1 Ιστορική Αναδρομή των Εργαλειομηχανών Αριθμητικού Ελέγχου	12
3.2 Λειτουργία CNC	16
3.3 Είδη Φρεζομηχανών	17
3.4 Αρχιτεκτονική των Επιτραπέζιων Εργαλειομηχανών	19
3.4.1 Το Σύστημα Ανοικτού Βρόγχου	19
3.4.2 Το Σύστημα Κλειστού Βρόγχου	19
3.4.3 Κινητήρες Πρόωσης Αξόνων	20
3.4.3.1 Τύποι Κινητήρων	20
3.4.4 Κινητήρας Κύριας Ατράκτου	21
3.4.4.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC Drives)	21
3.4.4.2 Τριφασικοί Ασύγχρονοι Κινητήρες	21
3.4.5 Το Ηλεκτρονικό Σύστημα Ελέγχου της Επιτραπέζιας Φρέζας CNC	21
3.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	22
Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη Εφαρμογών	23
4.1 Διαδικασία Υλοποίησης των Στόχων της Εργασίας	23
4.2 Εγκατεστημένος Εξοπλισμός στο Εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS)	23
4.3 Επιτραπέζια Φρέζα 3 Αξόνων Wegstr CNC	24
4.3.1 Hardware	24
4.3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Μηχανής Wegstr CNC	24
4.3.3 Το Λογισμικό της Φρέζας Wegstr CNC	27
4.4 Το Λογισμικό EasyEDA Pro	28
4.4.1 Σύντομη Περιγραφή της Σχηματικής Σχεδίασης-Schematic Design στο EasyEDA Pro	30
4.4.2 Σύντομη Περιγραφή του Σχεδιασμού Τυπωμένου Κυκλώματος-PCB Design	43
4.4.3 Η Συνοπτική Ροή Σχεδίασης στο EasyEDA Pro	55
4.5 Το Λογισμικό FlatCAM	57
4.5.1 Εισαγωγή	57
4.5.2 Προεπιλεγμένες Ρυθμίσεις στο FlatCAM	58
4.5.3 Προετοιμασία Εργασιών CNC για την Κατασκευή Μονής Όψεως Πλακέτα με το Πρόγραμμα FlatCAM	66
4.5.3.1 Gerber Object	66
4.5.3.2 Geometry Object	69
4.5.3.3 CNCJob Object	70
4.5.3.4 Excellon Objects	70
4.5.3.5 Αποκοπή Περιγράμματος της Πλακέτας (Board Cut-Out)	77

4.5.4 Προετοιμασία Εργασιών CNC για την Κατασκευή Διπλής Όψεως Πλακέτα με το Πρόγραμμα FlatCAM	81
4.6 Κοπτικά Εργαλεία της Μηχανής CNC Wegstr	94
4.7 Κώδικας Μηχανής	96
4.7.1 Εντολές G-Code που Χρησιμοποιούνται στη Μηχανή CNC Wegstr	97
4.7.2 Τύποι Εντολών M που Χρησιμοποιούνται στη Μηχανή CNC Wegstr	98
4.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	100
Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση Πλακέτας Τυπωμένου Κυκλώματος Μονής Όψεως	101
5.1 Σχεδίαση και Υλοποίηση Βαθυπερατού Φίλτρου Butterworth	101
5.2 Αντιμετώπιση Προβλημάτων Κατά το Επιτραπέζιο Φρεζάρισμα	110
5.3 Γενικές Πληροφορίες για το Μηχάνημα CNC Wegstr	111
5.4 Οδηγίες για Ασφαλή Ρύθμιση και Συντήρηση της Φρέζας CNC Wegstr	112
5.5 Μελλοντικές Εργασίες	114
5.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	115
Παράρτημα Α	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Σχεδίαση PCB και Κατασκευή με τη Χρήση Μηχανής CNC» εκπονήθηκε στο θεσμοθετημένο (ΦΕΚ Θεσμοθέτησης Εργαστηρίου 2192/15-07-2016 τ. Β') «Εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS)» του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Τεχνολογίες» του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό την ενίσχυση των δυνατοτήτων του Εργαστηρίου Συστημάτων VLSI & Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS) στην κατασκευή πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Παράλληλα, συμβάλλει στη βέλτιστη αξιοποίηση του εξοπλισμού και στην ομαλή ένταξη του στις μελλοντικές εκπαιδευτικές και ερευνητικές δραστηριότητες. Ειδικότερα, η εργασία πραγματεύεται τον σύγχρονο σχεδιασμό και την κατασκευή πλακετών PCB (Printed Circuit Board), μέσω συστημάτων CAD/CAM και της μηχανής CNC Wegstr, εξοπλίζοντας έναν νέο μηχανικό με σημαντικές δεξιότητες απέναντι στις τρέχουσες τάσεις αποβιομηχανοποίησης του ευρωπαϊκού χώρου. Κάθε νέος μηχανικός οφείλει να εστιάζει στη δημιουργία και την ανάπτυξη, αξιοποιώντας και βελτιώνοντας συνεχώς τα διαθέσιμα μέσα, παρά τις όποιες δυσκολίες. Με αυτή τη φιλοσοφία εκπονήθηκε και η συγκεκριμένη εργασία, επιδιώκοντας τη βέλτιστη ολιστική χρήση των τεχνολογικών εργαλείων.

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διπλωματικής υλοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες και εφαρμογές:

- Θεωρητική προσέγγιση της τεχνολογίας CNC, διερευνώντας το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον και τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα CAD/CAM/CAE μετασχηματίζουν τον τεχνολογικό σχεδιασμό και την παραγωγή.
- Εμβάθυνση στην αρχιτεκτονική των εργαλειομηχανών, με την ανάλυση των τεχνικών μερών μιας επιτραπέζιας φρέζας για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας της.
- Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εκμάθηση της ολοκληρωμένης ροής σχεδίασης για την ανάπτυξη πλακετών PCB. Μέσω των εργαλείων EasyEDA Pro και FlatCAM, παρουσιάζεται η πλήρης διαδρομή από τη σύλληψη του σχηματικού διαγράμματος έως την τελική προετοιμασία των αρχείων παραγωγής, αναδεικνύοντας τις βέλτιστες πρακτικές για τη σύνδεση του σχεδιασμού (Design) με την κατασκευή (Manufacturing).
- Πρακτική υλοποίηση και κατασκευή, για εφαρμογή των θεωρητικών γνώσεων όσο αναφορά την παραγωγή τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) μονής και διπλής όψεως με τη χρήση της μηχανής Wegstr CNC.
- Ανάπτυξη εξειδικευμένης εφαρμογής, αποδεικνύοντας στην πράξη την επιτυχή σχεδίαση και παραγωγή ενός λειτουργικού βαθυπερατού φίλτρου Butterworth.
- Διαχείριση και συντήρηση του εξοπλισμού, για την απόκτηση τεχνογνωσίας σχετικά με την ρύθμιση της μηχανής, την επιλογή κοπτικών εργαλείων, τη χρήση G-Code και την ασφαλή συντήρηση της φρέζας στο περιβάλλον του εργαστηρίου.

Οι ανωτέρω θεματικοί άξονες αναλύονται διεξοδικά στις ενότητες που έπονται, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα τόσο του θεωρητικού υποβάθρου όσο και της πρακτικής εφαρμογής τους.

Η δομή της εργασίας έχει ως ακολούθως:

Στο Κεφάλαιο 2, εξετάζεται ο ρόλος του μηχανολογικού εξοπλισμού μέσα στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, αναλύοντας πώς οι τεχνολογικές εξελίξεις μετασχηματίζουν την παραγωγική διαδικασία. Αρχικά, δίνεται ο ορισμός της σχεδιομελέτης και της σχεδίασης με τη χρήση υπολογιστή, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των λογισμικών CAD/CAM/CAE, τα οποία αποτελούν πλέον αναπόσπαστα εργαλεία της σύγχρονης μηχανικής.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια αναφορά στις μελλοντικές προοπτικές των συστημάτων αυτών, σκιαγραφώντας τις τάσεις που αναμένεται να κυριαρχήσουν τα επόμενα χρόνια.

Στο Κεφάλαιο 3, αναλύεται η τεχνολογία των εργαλειομηχανών CNC (φρέζες), ξεκινώντας από την ιστορική αναδρομή του αριθμητικού ελέγχου και τον τρόπο λειτουργίας τους στην σύγχρονη παραγωγή. Παρουσιάζονται τα διάφορα είδη φρεζομηχανών, με ιδιαίτερη έμφαση στην αρχιτεκτονική των επιτραπέζιων μοντέλων. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται τα συστήματα ελέγχου ανοικτού και κλειστού βρόγχου, καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές των κινητήρων πρόωσης και της κύριας ατράκτου (κινητήρες συνεχούς ρεύματος και τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες). Το κεφάλαιο καταλήγει με την ανάλυση του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου, που αποτελεί το κεντρικό σύστημα λήψης και εκτέλεσης των εντολών από τη μηχανή CNC.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η ανάπτυξη των εφαρμογών της παρούσας εργασίας, ξεκινώντας με την αποσαφήνιση των στόχων που τέθηκαν για το πρακτικό μέρος της μελέτης. Γίνεται αναλυτική περιγραφή του εγκατεστημένου εξοπλισμού στο Εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS), με επίκεντρο την επιτραπέζια φρέζα τριών αξόνων Wegstr CNC. Η παρουσίαση της μηχανής περιλαμβάνει την ανάλυση του υλικού (hardware), των εξειδικευμένων τεχνικών χαρακτηριστικών της και του συνοδευτικού λογισμικού που απαιτείται για τον έλεγχο και τη λειτουργία της, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της παραγωγικής διαδικασίας. Στη συνέχεια, αναλύεται η μετάβαση από τον ψηφιακό σχεδιασμό στην υλική κατασκευή, ξεκινώντας με τη συνοπτική ροή σχεδίασης στο περιβάλλον του EasyEDA Pro. Κεντρικό σημείο αναφοράς αποτελεί η χρήση του λογισμικού FlatCAM, όπου παρουσιάζονται οι απαραίτητες προεπιλεγμένες ρυθμίσεις και η διαδικασία προετοιμασίας των εργασιών CNC. Εξετάζεται διεξοδικά η διαχείριση των αντικειμένων Gerber, Geometry, CNCJob και Excellon, τα οποία είναι καθοριστικά για τη δημιουργία αρχείων φρεζαρίσματος και διάτρησης. Η ανάλυση καλύπτει τόσο την κατασκευή πλακετών μονής όψεως, συμπεριλαμβανομένης της αποκοπής του περιγράμματος της πλακέτας (Board Cut-Out), όσο και τις εξειδικευμένες απαιτήσεις για την υλοποίηση πλακετών διπλής όψεως, διασφαλίζοντας την ακρίβεια σε κάθε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου, αναλύονται οι πρακτικές παράμετροι της κατεργασίας, ξεκινώντας από την επιλογή των κατάλληλων κοπτικών εργαλείων για το φρεζάρισμα, τη διάτρηση και την κοπή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον κώδικα μηχανής, με λεπτομερή παρουσίαση των εντολών G-Code και M-Code που υποστηρίζονται από την μηχανή Wegstr CNC.

Στο Κεφάλαιο 5, η θεωρητική και τεχνική προετοιμασία μετουσιώνεται στην πράξη μέσα από τη σχεδίαση και υλοποίηση ενός βαθυπερατού φίλτρου Butterworth, διαδικασία κατά την οποία εξετάζεται η αντιμετώπιση προβλημάτων που προέκυψαν κατά το επιτραπέζιο φρεζάρισμα. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με γενικές πληροφορίες για την μηχανή Wegstr CNC καθώς και καθοριστικές οδηγίες για την ασφαλή ρύθμιση και την ορθή συντήρηση του εξοπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

2.1 Το Σύγχρονο Βιομηχανικό Περιβάλλον

Από το τέλος του 20^{ου} αιώνα, το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, χαρακτηρίζεται από μια έντονη τάση προς την ομογενοποίηση και την παγκοσμιοποίηση. Οι εταιρείες παραγωγής καλούνται να αντιμετωπίσουν ριζικές αλλαγές που τις ωθούν να βελτιώσουν τις διαδικασίες παραγωγής, προγραμματισμού και διαχείρισης. Παρατηρείται, διεύρυνση των αγορών, συχνές εξαγορές και συγχωνεύσεις, με αποτέλεσμα την ενοποίηση των παραγωγικών μονάδων, σε πολυεθνικούς ομίλους. Η προτεραιότητα των Μικρομεσαίων Επιχειρήσεων μετατοπίζεται από την κερδοφορία στην ίδια τη βιωσιμότητα.

Τα δε προϊόντα λόγω της ραγδαίας τεχνολογικής εξέλιξης και του ανταγωνισμού απαξιώνονται ταχύτερα. Ο ανταγωνισμός τα οδηγεί σε μικρότερους κύκλους ζωής, σε προσπάθεια ελαχιστοποίησης του χρόνου παραγωγής και ανάπτυξης τους, με το μικρότερο κάθε φορά δυνατό κόστος. Στο πλαίσιο αυτό οι μηχανικοί σήμερα δεν επικεντρώνονται μόνο στη λειτουργικότητα αλλά αναζητούν τρόπους να αναπτύξουν και να θέσουν σε παραγωγή νέα ποιοτικά και ποσικά προϊόντα σε λογικό κόστος, φιλικά προς το περιβάλλον.

Ο ρόλος των μηχανικών σχεδιασμού ανάπτυξης, είναι όχι απλώς να ανακαλύπτουν τη γνώση, όπως οι επιστήμονες, αλλά να την εφαρμόζουν. Τις θεωρητικές γνώσεις να τις μετατρέπουν σε πρακτικές λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που σχετίζονται με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, νομικά ζητήματα, το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Σε συνδυασμό με τον επιθετικό ανταγωνισμό, τους πιο μορφομένους και απαιτητικούς πελάτες και την ταχύρυθμη αλλαγή στις τεχνολογίες διεργασιών δημιουργείται η ανάγκη για την εισαγωγή ενός νέου συστήματος παραγωγής που να μπορεί να αντιδρά σε αυτές τις αλλαγές γρήγορα και οικονομικά.

Ο Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών, έχει εξελιχθεί σε ένα σύστημα διεπιστημονικής συνεργασίας διαφόρων ειδικοτήτων. Οι μηχανολόγοι και οι πολιτικοί μηχανικοί εστιάζουν στην αντοχή των υλικών και στη δομική ακεραιότητα. Οι ηλεκτρολόγοι και οι ηλεκτρονικοί σχεδιάζουν τα κυκλώματα και τα συστήματα ισχύος. Οι μηχανικοί λογισμικού και ελέγχου συνδυάζουν το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση συστημάτων ελέγχου, με την ανάπτυξη λογισμικού, για τον έλεγχο και τη ρύθμιση αυτών των συστημάτων.

Η μέθοδος του Σύγχρονου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, η οποία εφαρμόζεται παντού από την αυτοκινητοβιομηχανία έως τα καταναλωτικά ηλεκτρονικά, βασίζεται στην ταυτόχρονη εξέλιξη των διαφόρων φάσεων σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος. Η επιτυχία αυτής της μεθοδολογίας επιτρέπει τον εντοπισμό των σφαλμάτων μειώνοντας τις καθυστερήσεις.

Στην εξέλιξη αυτής της μεθοδολογίας, συνέβαλαν οι τεχνολογίες **CAD/CAM/CAE**. Αποτελούν τη βάση της σύγχρονης βιομηχανίας, προσφέροντας προϊόντα υψηλών προδιαγραφών με μειωμένο κόστος και υψηλή ανταγωνιστικότητα. Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που προέκυψε με τη διάδοση της χρήσης των τεχνολογιών τύπου CAD/CAM/CAE είναι η διαχείριση του μεγάλου όγκου των δεδομένων καθώς και η έλλειψη συντονισμού και επίλυσης σφαλμάτων κατά τον κύκλο ανάπτυξης, μελέτης και σχεδιασμού ενός προϊόντος. Τη λύση για την οργάνωση, την αποθήκευση, την παρακολούθηση και διαχείριση όλων των τεχνικών δεδομένων ενός προϊόντος αποτελούν τα λογισμικά **PDM** (Product Data Management). Η Διαχείριση Δεδομένων Προϊόντων PDM διασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων, την ιχνηλασιμότητα και τη συνεργασία ομάδων μηχανικών καθώς και τη μείωση του χρόνου ανάπτυξης των προϊόντων.

Ο συνδυαστικός ιστός που διαχειρίζεται τα δεδομένα των CAD/CAM/CAE και του PDM είναι το λογισμικό **PLM** (Product Lifestyle Management).

Η Διαχείριση του Κύκλου Ζωής ενός προϊόντος PLM είναι η διεργασία από τη σύλληψη της αρχικής ιδέας, τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη διάθεση του προϊόντος έως και την απόσυρση του. Στην πραγματικότητα συνδέει ανθρώπους, διαδικασίες και δεδομένα σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος.

Τη σύνδεση των τεχνικών δεδομένων PLM με την παραγωγή και τα οικονομικά αναλαμβάνει το λογισμικό **ERP** (Enterprise Resource Planning). Το Σύστημα Ενδοεπιχειρησιακού Σχεδιασμού ERP επιλύει το πρόβλημα των ασύνδετων δεδομένων. Αντί κάθε επιχειρησιακού τμήμα (λογιστήριο, πωλήσεις, αποθήκη) να έχει δικό του ξεχωριστό αρχείο, όλα τα δεδομένα καταχωρούνται σε μία βάση. Επιπρόσθετα εάν γίνει μια αλλαγή στο σχεδιασμό PLM, το ERP ενημερώνεται αυτόματα για να ξεκινήσει η προμήθεια υλικών και η παραγωγή. Με απλά λόγια, τα δύο αυτά θεμελιώδη συστήματα είναι συμπληρωματικά, εξασφαλίζοντας την ποιότητα των προϊόντων, την ταχύτητα παραγωγής και την λειτουργική ευελιξία και απόδοση.

2.2 Ορισμός Σχεδιομελέτης και Παραγωγής με Χρήση Υπολογιστή

Το **CAD** (Computer Aided Design), δηλ. η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ χρησιμοποιεί λογισμικό γραφικών για τη δημιουργία, επεξεργασία, ανάλυση και βελτίωση ενός σχεδιαστικού προτύπου. Καθιστά δυνατή την ακριβή απεικόνιση των γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός εξαρτήματος ή μιας κατασκευής. Είναι ένα σημαντικό εργαλείο για μηχανικούς και σχεδιαστές καθώς μπορεί γρήγορα να δημιουργήσει τρισδιάστατα (3D) μοντέλα και τεχνικά σχέδια. Με το CAD γίνεται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση ενός προϊόντος. Δημιουργείται στον υπολογιστή η μορφή του κάθε εξαρτήματος και όλης της συναρμολόγησης και γίνεται προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας.

Οι τεχνολογίες CAD ελαττώνουν το χρόνο σχεδίασης και μελέτης, προσθέτουν ευελιξία στις αλλαγές και τροποποιήσεις, το οποίο τελικά συνεπάγεται την υποχώρηση του συνολικού κόστους του σχεδιασμού. Επιπλέον, δίνουν τη δυνατότητα της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τομέων μιας επιχείρησης ή ακόμη και σε παγκόσμιο επίπεδο μεταξύ ομάδων, αφού τα αρχεία ανταλλάσσονται ψηφιακά. Δημοφιλή εμπορικά λογισμικά CAD γενικής χρήσης για 2D/3D σχεδίαση είναι το AutoCAD και το BricsCAD. Το AutoCAD συνεχίζει να είναι το πιο αξιόπιστο σε αρχιτεκτονική, μηχανολογία και κατασκευές, με ενσωματωμένα πλέον εργαλεία AI για αυτοματοποίηση εργασιών. Το BricsCAD προσφέρει χαμηλότερο κόστος, ενσωματώνει εργαλεία AI για την αυτόματη ταξινόμηση αντικειμένων και τη μετατροπή των 2D σχεδίων σε 3D μοντέλα. Για μηχανολογικό σχεδιασμό και παραγωγή, κατάλληλο για σχεδιασμό εξαρτημάτων, είναι το διακεκριμένο λογισμικό SolidWorks. Το Autodesk Fusion είναι ιδανικό για μικρομεσαίες επιχειρήσεις αφού συνδυάζει 3D σχεδίαση CAD, κατασκευή CAM, μηχανική ανάλυση CAE και σχεδιασμό PCB σε μία πλατφόρμα, εξαλείφοντας την ανάγκη για πολλαπλά, ακριβά λογισμικά. Παράλληλα, επιτρέπει σε ομάδες να εργάζονται στο ίδιο έργο ταυτόχρονα, να μοιράζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από οποιαδήποτε τοποθεσία (Cloud-Based συνεργασία). Το Siemens NX και το CATIA χρησιμοποιούνται από μεγάλες βιομηχανίες για τη σχεδίαση εξαιρετικά σύνθετων μοντέλων με τεράστιο όγκο δεδομένων. Εξαιρετικό για ομάδες που εργάζονται ταυτόχρονα στο ίδιο μοντέλο, βλέποντας τις αλλαγές σε πραγματικό χρόνο, αποτελεί το Onshape. Το Onshape είναι ένα σύγχρονο, cloud-native λογισμικό τρισδιάστατου σχεδιασμού (3D CAD) και διαχείρισης δεδομένων προϊόντων (PDM), το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά μέσω διαδικτύου. Προσφέρει μια πλατφόρμα όπου μηχανικοί και σχεδιαστές μπορούν να σχεδιάζουν μέρη (parts), να δημιουργούν συνθέσεις (assemblies) και τεχνικά σχέδια (drawings) συνεργαζόμενοι ταυτόχρονα στο ίδιο αρχείο.

Από το λογισμικό CAD η ψηφιακή πληροφορία εισάγεται στο σύστημα **CAM** (Computer Aided Manufacturing), το οποίο περικλείει τις τεχνικές με υπολογιστή, που διευκολύνουν τον προγραμματισμό, τη λειτουργία και τον έλεγχο μιας παραγωγικής εγκατάστασης. Βασική εφαρμογή της τεχνολογίας CAM, είναι ο αριθμητικός έλεγχος NC (Numeric Control), ο οποίος χρησιμοποιεί προγραμματιστικά εργαλεία, για να ελέγξει λειαντικές, κοπτικές, διατρητικές κ.α. εργαλειομηχανές.

Μέσω του CAM, επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια, ελάττωση του κόστους παραγωγής και περιορισμός των ανθρώπινων σφαλμάτων.

Με τα προγράμματα **CAE** (Computer Aided Engineering), εξετάζεται και εκτιμάται η απόδοση ενός προϊόντος, πριν το στάδιο της παραγωγής, χωρίς να χρειαστεί να δημιουργηθεί ένα φυσικό πρωτότυπο. Είναι η τεχνολογία που απαρτίζεται από λογισμικά που προβαίνουν σε υπολογιστική ανάλυση ενός εξαρτήματος ή μιας κατασκευής. Χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης, τόσο υπολογιστικά όσο και πρωτότυπα. Στην ανάλυση χρησιμοποιούνται εργαλεία για εξέταση της συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της μελέτης και στην τροποποίηση της μορφής του προϊόντος.

2.3 Εξέλιξη των Λογισμικών CAD/CAM/CAE

Η ιστορία των τεχνολογιών CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing) και CAE (Computer Aided Engineering) είναι στενά συνυφασμένη με την πρόοδο της πληροφορικής, την ανάπτυξη των ψηφιακών συστημάτων και την εξέλιξη της βιομηχανικής αυτοματοποίησης. Η εμφάνιση του CAD εντοπίζεται στη δεκαετία του 1950, στις Ηνωμένες Πολιτείες, όταν στο εργαστήριο του MIT δοκίμαζαν τη σχεδίαση τεχνικών σχεδίων με χρήση υπολογιστή. Όλα τα σύγχρονα προγράμματα CAD, βασίζονται στο πρώτο διαδραστικό γραφικό έργο το «Sketchpad» του Ivan Sutherland. Το Sketchpad μετέτρεψε τον υπολογιστή από ένα εργαλείο υπολογισμών σε ένα εργαλείο δημιουργίας.

Στον τομέα της κατασκευής, το λογισμικό APT (Automatically Programmed Tool) υπήρξε ο προπάτορας του CAD/CAM, καθώς χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των γεωμετρικών σημείων στα οποία η μηχανή θα έπρεπε να κινείται και να κόβει, προκειμένου να υλοποιήσει πολύπλοκα μηχανολογικά σχέδια. Το πρώτο εγχείρημα αυτοματοποιήσεις των μηχανών με αξιοποίηση ψηφιακών εντολών συνέβαλε στην κατασκευή των NC (Numerical Control) και στη συνέχεια των CNC (Computer Numerical Control) τεχνολογιών.

Τη δεκαετία του 1970, η επάρκεια των γραφικών διεπαφών και η μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς, επέφερε την εμπορική διάδοση των λογισμικών CAD/CAM. Παραδείγματα, το λογισμικό CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application), που αναπτύχθηκε το 1977, από την εταιρία αεροπορικού και αεροδιαστημικού λογισμικού Dassault Aviation και το AutoCAD που κυκλοφόρησε το 1982 από την εταιρία κατασκευής τεχνικού λογισμικού την Autodesk και αποτέλεσε την πρώτη προσιτή εφαρμογή CAD για προσωπικούς υπολογιστές.

Στη δεκαετία του 1980 και του 1990, τα λογισμικά συνένωσαν προσομοιώσεις, ενέργειες τρισδιάστατης σχεδίασης και κατεργασιών πολλαπλών αξόνων. Η δυνατότητα ένωσης του σχεδιασμού και της κατεργασίας σε μια ενιαία ψηφιακή πλατφόρμα, δημιούργησε νέα μοντέλα στην διαδικασία παραγωγής προϊόντων.

Τα συστήματα CAD/CAM κέρδισαν μεγαλύτερη σημασία με την έλευση της Βιομηχανίας 4.0. Λειτουργούν ως κέντρα που συνδέουν τον σχεδιασμό, την προσομοίωση CAE (Computer Aided Engineering), την κατεργασία CAM, την παραγωγή και την Διαχείριση του Κύκλου Ζωής του Προϊόντος (PLM). Επιπρόσθετα, η συνένωση τους με τεχνολογίες όπως τα Digital Twins, το IoT και την τεχνητή νοημοσύνη μεταμορφώνουν τις παραδοσιακές γραμμές παραγωγής σε έξυπνα, ψηφιακά συστήματα και την εξάπλωση των προϊόντων με δυνατότητα προγνωστικής βελτιστοποίησης.



Εικόνα 1: Βιομηχανία 4.0 που προσδιορίζεται από την πλήρη ψηφιακή παραγωγή [2.11].

2.4 Μελλοντικές Προοπτικές

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης έχει ήδη καθορίσει τη νέα γενιά CAD/CAM, γνωστή ως **Intelligent CAD 2.0 (ICAD 2.0)**. Το ICAD 2.0 μετατρέπει τη διαδικασία σχεδιασμού από μια αυστηρά χειροκίνητη διαδικασία σε μια εννοιολογική προσέγγιση. Επιτρέπει στον σχεδιαστή να περιγράφει τους περιορισμούς, τους στόχους και τις λειτουργικές απαιτήσεις και η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιώντας αλγορίθμους να εξερευνεί χιλιάδες εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού βελτιστοποιώντας το υλικό, την απόδοση και το κόστος, δημιουργώντας σχήματα που δεν θα μπορούσαν να συλληφθούν εύκολα από τον άνθρωπο. Τα νέα συστήματα ICAD 2.0 δίνουν τη δυνατότητα στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με το CAD μέσω φυσικής γλώσσας. Εργαλεία όπως το CAD Assist 2.0 της CloudNC συγχωνεύουν την τεχνητή νοημοσύνη ώστε να αναλύει το γεωμετρικό μοντέλο και να προτείνει στρατηγικές κατεργασίας, μειώνοντας το χρόνο προγραμματισμού μιας μηχανής CNC.

Τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα (LLMs), δηλαδή πολύπλοκοι αλγόριθμοι που μπορούν να επεξεργαστούν και να δημιουργήσουν κείμενο που μοιάζει να προέρχεται από άνθρωπο, μπορούν να αυτοματοποιήσουν τη σχεδίαση CAD, μετατρέποντας περιγραφές σε φυσική γλώσσα (π.χ. σχεδίασε ένα κύκλωμα τροφοδοσίας LED) σε εκτελέσιμο κώδικα, ειδικά όταν συνδυάζονται με εργαλεία ανοικτού κώδικα όπως το FreeCAD.

Συνοπτική εξέταση της Machine Learning για το CAD/CAM τονίζει ότι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις όπως, η Generative Design (Δημιουργική Σχεδίαση), τα μοντέλα (ΧΑΙ) Explainable AI (Επεξηγηματική Τεχνητή Νοημοσύνη), οι τεχνολογίες Edge AI (Τεχνητή Νοημοσύνη Αιχμής) αλλά και η Transfer Learning (Μεταφορά Γνώσης), έχουν μεγάλα περιθώρια εφαρμογής στο βιομηχανικό σχεδιασμό. Επιπλέον, η σύνδεση με τις τεχνολογίες επανυξημένης και εικονικής πραγματικότητας (AR/VR) στο χώρο του CAD/CAM ανοίγει ορίζοντες για την αλληλεπίδραση με τον σχεδιασμό σε πραγματικό χρόνο.

Καθοριστικός στόχος στα συστήματα CAD/CAM είναι να εξασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα. Οι γεωμετρικές πληροφορίες επιβάλλεται να ανταλλάσσονται επακριβώς μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και λογισμικών. Η ενσωμάτωση σχεδιασμού και κατεργασίας θέτει ως προϋπόθεση τη χρήση κοινών προτύπων αρχείων, ώστε να περιορίζονται οι γεωμετρικές ανακρίβειες και οι απώλειες πληροφοριών. Τα «έξυπνα» πρότυπα αρχείων συμπεριλαμβάνουν στοιχεία προσομοίωσης, τις ιδιότητες των υλικών και πληροφορίες βιωσιμότητας, συνδέοντας έτσι τα συστήματα CAD/CAM με το πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 και τα Digital Twins (Ψηφιακά Δίδυμα). Έτσι, τα Digital Twins δεν είναι απλώς μια απεικόνιση, αλλά ένα εργαλείο που προβλέπει τη συμπεριφορά του εξαρτήματος, εκμηδενίζοντας τη σπατάλη των πόρων. Αυτή ακριβώς η ενσωμάτωση μετατρέπει ένα στατικό σχέδιο σε έναν ζωντανό ψηφιακό οργανισμό.

2.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [2.1] **Abouel Nasr, E., & Kamrani, A. K. (2007).** Computer-based design and manufacturing. Springer.
- [2.2] **Anderson, D. M. (2004).** Design for manufacturability & concurrent engineering: How to design for low cost, design in high quality, design for lean manufacture, and design quickly for fast production. CIM Press.
- [2.3] **Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. de J. (2022).** Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335.
- [2.4] **Budak, E. (2006).** Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12–13), 1478–1488.
- [2.5] **Dixon, J. R. (1966).** Design engineering: Inventiveness, analysis, and decision making. McGraw-Hill.
- [2.6] **Ελεκίδης, Α. (2022).** Τεχνικές βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε διεργασίες συνεχούς και διαλείπουσας λειτουργίας [Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης]. Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών
- [2.7] **Encarnacao, J. L., Lindner, R., & Schlechtendahl, E. G. (2012).** Computer aided design: Fundamentals and system architectures. Springer.
- [2.8] **Hurst, K. (1999).** Engineering design: Principles. Elsevier Science & Technology Books.
- [2.9] **Kumar, S., Kapoor, S., Vardhan, H., & Zhao, Y. (2025).** Generative AI for CAD automation: Leveraging large language models for 3D modeling. *arXiv Preprint*, arXiv:2508.00843.
- [2.10] **Kurfess, T. R. (2005).** Robotics and automation handbook (Vol. 414). CRC Press.
- [2.11] **Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014).** Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4> (doi.org in Bing).
- [2.12] **Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007).** Engineering design: A systematic approach (3rd ed.). Springer.
- [2.13] **Society of Manufacturing Engineers. (1976).** Tool and manufacturing engineers handbook. McGraw-Hill.
- [2.14] **Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2008).** Product design and development (4th ed.). McGraw-Hill.
- [2.15] **Zou, Q., Wu, Y., Liu, Z., Xu, W., & Gao, S. (2024).** Intelligent CAD 2.0. *Visual Informatics*, 8(4), 1–12.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ (ΦΡΕΖΕΣ) CNC

3.1 Ιστορική Αναδρομή των Εργαλειομηχανών Αριθμητικού Ελέγχου

Στη μηχανουργική τεχνολογία η πορεία του αριθμητικού ελέγχου, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, αποτελεί μια μακρά και συναρπαστική διαδικασία, αντανakλώντας την τεχνολογική πρόοδο της ανθρωπότητας. Στις πρώτες μηχανικές προσπάθειες αυτοματοποίησης, πρωταγωνιστικό ρόλο κατείχαν η Ελλάδα και η Κίνα. Αντιπροσωπευτικότερος ο «Μηχανισμός των Αντικυθήρων». Χρονολογείται περίπου στον 2^ο αιώνα π.Χ. Μέσω γραναζιών, μετέτρεπε αριθμητικά δεδομένα σε μηχανική κίνηση. Χρησιμοποιούνταν πιθανώς για αστρονομικούς και ημερολογιακούς υπολογισμούς. Ο μηχανισμός του ήταν ιδιαίτερα σύνθετος, έχοντας εσωτερικά 32 οδοντωτούς τροχούς, ενώ είχε επιγραφές για το ζωδιακό κύκλο και τους μήνες. Ανελκύστηκε από ναυάγιο που εντόπισαν σφουγγαράδες της Σύμης το 1900 κοντά στα Αντικύθηρα.



Εικόνα 2: Ο μηχανισμός των Αντικυθήρων (Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο).

Απόδειξη της υψηλής μηχανικής κατάστασης των αρχαίων Κινέζων, θεωρείται ο μηχανισμός «Άρματα που δείχνουν το Νότο». Χρονολογείται περίπου στο 250 μ.Χ.. Δεν χρησιμοποιούσαν μαγνήτη, αλλά ένα σύστημα γραναζιών, για να διατηρούν μια φιγούρα στραμμένη προς το νότο, ανεξάρτητα από την πορεία του άρματος. Όταν το άρμα έστριβε, τα γρανάζια περιστρέφονταν ανάλογα, κρατώντας τον ξύλινο δείκτη στραμμένο προς το νότο. Λόγω της ανάγκης για επίπεδο έδαφος, χρησιμοποιούνταν κυρίως σε αυτοκρατορικές πομπές.



Εικόνα 3: Άρμα που δείχνει το Νότο (Μουσείο Επιστημών, Λονδίνο).

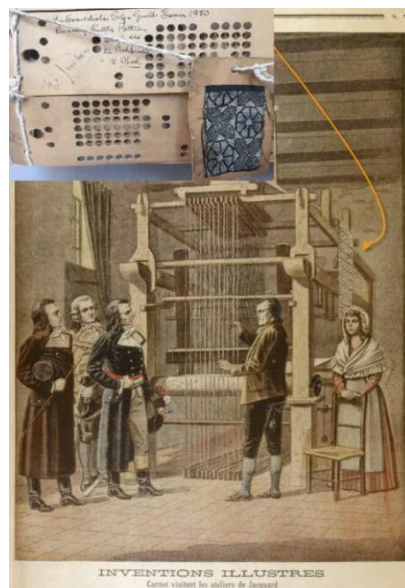
Κατά τη διάρκεια του 14ου αιώνα μ.Χ. μηχανικά ρολόγια σε πύργους εκκλησιών και δημαρχείων της Ευρώπης, οδήγησαν στην εμφάνιση του ελέγχου μηχανικών διατάξεων μέσω ακολουθίας πληροφοριών. Εκτός από την ένδειξη της ώρας, οι διακοσμητικές αυτές μορφές, αναπαριστούσαν την κίνηση των πλανητών, αποτελώντας τον πρόδρομο του αριθμητικού ελέγχου (NC). Κινούνταν μέσω ακολουθιών πληροφοριών που αποθηκεύονταν σε γρανάζια, έκκεντρα και κυλίνδρους με ακίδες. Ο κύλινδρος με τις ακίδες καθόριζε ποια κίνηση θα εκτελεστεί και τότε, επιτρέποντας τον έλεγχο των μηχανικών διατάξεων.

Ο Γάλλος μαθηματικός και φυσικός Blaise Pascal το 1642 κατασκεύασε τον πρώτο μηχανικό υπολογιστή, ο οποίος έγινε γνωστός ως Πασκαλίνα. Είχε τροχίσκους και γρανάζια, τα οποία περιέστρεφαν και εμφάνιζαν τα αποτελέσματα. Η μηχανή είχε τη δυνατότητα να προσθέτει, να αφαιρεί, να πολλαπλασιάζει και να διαιρεί.



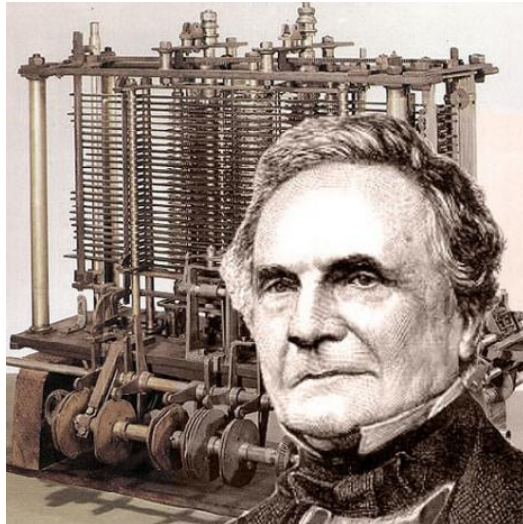
Εικόνα 4: Ο Blaise Pascal και ο πρώτος μηχανικός υπολογιστής.

Στη βιομηχανική επανάσταση, στις αρχές του 1800, ο Joseph Jacquard, ανέπτυξε ένα σύστημα οδηγιών για να αυτοματοποιήσει τον αργαλειό και άρα να αυξήσει την παραγωγή του. Οι οδηγίες πλεξίματος αποθηκεύτηκαν σε διάτρητες ξύλινες κάρτες. Όπου υπήρχαν οπές η βελόνα μπορούσε να περάσει, όπου δεν υπήρχαν η βελόνα δεν περνούσε. Σε αυτό το δυαδικό σύστημα βασίστηκε αργότερα το 0 και το 1 στα ψηφιακά ηλεκτρονικά.



Εικόνα 5: Ο Joseph Jacquard με τον προγραμματιζόμενο αργαλειό που εφηύρε.

Ο Άγγλος μαθηματικός, φιλόσοφος και μηχανικός, ο Charles Babbage, το 1834 προχώρησε στο σχεδιασμό της Αναλυτικής Μηχανής, του πρώτου μηχανικού υπολογιστή, που μπορούσε να κάνει αριθμητικές πράξεις, με ακρίβεια έξι δεκαδικών ψηφίων, χρησιμοποιώντας διάτρητες κάρτες. Η δομή του υπολογιστή ήταν ουσιαστικά η ίδια με αυτή που κυριάρχησε στον σχεδιασμό των υπολογιστών στην ηλεκτρονική εποχή.



Εικόνα 6: Ο Charles Babbage και η Αναλυτική Μηχανή του.

Μετά από 100 χρόνια ο Howard Aiken, Αμερικανός φυσικός και πρωτοπόρος της πληροφορικής, σχεδίασε μια από τις πρώτες μεγάλης κλίμακας αυτόματες υπολογιστικές μηχανές. Ήταν ηλεκτρομηχανική και όχι αμιγώς ηλεκτρονική, χρησιμοποιώντας γρανάζια και διακόπτες, αν και ελεγχόταν από ηλεκτρικά σήματα.

Ηλεκτρομηχανικές μηχανές κατασκεύασε και ο Konrad Zuse, Γερμανός μηχανικός. Κατασκεύασε τη σειρά Z, η οποία περιλάμβανε τις πρώτες προγραμματιζόμενες ψηφιακές μηχανές στον κόσμο. Το 1943 κατασκευάστηκε από τους John Mauchly και Presper Eckert, ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής. Ο ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) θεωρείται ο πρώτος μεγάλης κλίμακας, πλήρως ηλεκτρονικός, ψηφιακός υπολογιστής γενικής χρήσης. Αρχικά σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό βαλλιστικών τροχιών για τον αμερικάνικο στρατό. Χρησιμοποιούσε περίπου 18.000 λυχνίες κενού, ζύγιζε 30 τόνους και κάλυπτε επιφάνεια 163 τ.μ.. Ήταν χιλιάδες φορές ταχύτερος από τους ηλεκτρομηχανικούς υπολογιστές της εποχής του. Ο προγραμματισμός του γινόταν με καλώδια και διακόπτες κάτι που απαιτούσε ημέρες για την επαναρύθμιση του.



Εικόνα 7: Ο John Mauchly, ο Presper Eckert και ο ENIAC.

Ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος στον Ειρηνικό ξεκίνησε μετά την αιφνιδιαστική επίθεση της Ιαπωνίας στο Περλ Χάρμπορ. Η επίθεση προκάλεσε σοβαρές ζημιές στον αμερικανικό στόλο και μεγάλες απώλειες στην αμερικανική πολεμική αεροπορία. Κατά τη διάρκεια του πολέμου στον Ειρηνικό η ταχεία επισκευή και παραγωγή ανταλλακτικών ήταν κρίσιμη. Έτσι γεννήθηκε ο σύγχρονος αριθμητικός έλεγχος των εργαλειομηχανών.

Οι συμβατικές μέθοδοι δεν μπορούσαν να παράγουν γρήγορα και με ακρίβεια. Συχνά η κόπωση των τεχνιτών οδηγούσε σε ελαττωματικές κατασκευές. Η λύση ήρθε από τον John Parsons, ο οποίος συνέλαβε την ιδέα να χρησιμοποιήσει συντεταγμένες σε διάτρητες κάρτες για να ελέγχει τις κινήσεις μιας εργαλειομηχανής. Η πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ χρηματοδότησε την έρευνα, η οποία μεταφέρθηκε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT). Το 1952 το (MIT) παρουσίασε την πρώτη επιτυχημένη αριθμητική εργαλειομηχανή. Χρησιμοποιούσε διάτρητη ταινία για να καθοδηγεί τους άξονες της μηχανής. Για τις διαδρομές του κοπτικού εργαλείου χρειαζόταν ηλεκτρονικός υπολογιστής. Οι διαδρομές αποθηκεύονταν στις διάτρητες κάρτες. Οι κάρτες αυτές διαβαζόταν αυτόματα από ένα μέσο ανάγνωσης που διέθετε η εργαλειομηχανή. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν σερβοκινητήρες, οι οποίοι ελέγχονται από μια κεντρική μονάδα ελέγχου, για κίνηση σε τρεις άξονες.

Το 1954 στο Εργαστήριο Σερβομηχανισμών του MIT, άρχισε να αναπτύσσεται η πρώτη συμβολική γλώσσα προγραμματισμού για αριθμητικά ελεγχόμενες μηχανές (NC), η APT (Automatically Programmed Tool). Η γλώσσα προγραμματισμού APT, ο Αυτόματος Προγραμματισμός Εργαλείων, καθιστούσε δυνατό στους χειριστές να περιγράφουν τη γεωμετρία ενός εξαρτήματος και τις κινήσεις της εργαλειομηχανής χρησιμοποιώντας αγγλικές εντολές, τις οποίες ένας υπολογιστής μετέτρεπε σε οδηγίες για τη μηχανή. Ένα αντικείμενο που αποδεικνύει την επιτυχία αυτής της τεχνολογίας είναι το αλουμινένιο τασάκι. Κατασκευάστηκε τον Φεβρουάριο του 1959 και μοιράστηκε ως αναμνηστικό στους παρευρισκόμενους, κατά τη διάρκεια επίσημης επίδειξης του συστήματος APT από το MIT. Έφερε ανάγλυφα τα γράμματα «APT II // AIA MIT AMC//FEB. '59» δηλώνοντας τη συνεργασία του MIT με την Αεροπορική Βιομηχανική Ένωση (ΑΙΑ) και τη Διοίκηση Αεροπορικού Υλικού (AMC). Συμβόλιζε τη μετάβαση από το χειροκίνητο προγραμματισμό στην αυτόματη παραγωγή.



Εικόνα 8: Το αναμνηστικό τασάκι κατασκευασμένο από την πρώτη ψηφιακή εργαλειομηχανή.

Μετά από τέσσερα χρόνια, η εταιρία Bendix αγόρασε την πατέντα από τον Parson, σηματοδοτώντας την κατασκευή της πρώτης εμπορικής εργαλειομηχανής Αριθμητικού Ελέγχου (NC). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μικροεπεξεργαστών επέτρεψε τη μετάβαση από τις NC εργαλειομηχανές στις CNC (Computer Numerical Control) μηχανές Αριθμητικού Ελέγχου με Υπολογιστή. Τα συστήματα CNC είναι πιο ευέλικτα από ότι τα απλά NC επειδή επιτρέπουν τον σχεδιασμό, την αποθήκευση στη μνήμη και τη στιγμιαία ανάκληση των προγραμμάτων.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, η ανάπτυξη των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, οδήγησε στις εργαλειομηχανές Άμεσου Αριθμητικού Ελέγχου (Direct Numerical Control, DNC).

Στις εργαλειομηχανές DNC ένας κεντρικός υπολογιστής ελέγχει και διαχειρίζεται απευθείας πολλαπλές εργαλειομηχανές CNC μέσω ενός δικτύου. Ενώ κάθε μηχανήμα CNC έχει το δικό του πρόγραμμα στη μνήμη του, στο DNC τα προγράμματα κατεργασίας αποθηκεύονται κεντρικά και αποστέλλονται στις μηχανές σε πραγματικό χρόνο.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, οι εργαλειομηχανές NC, CNC και DNC συνδέονται μεταξύ τους, μέσω ενός συστήματος χειρισμού υλικών, σε ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής, το FMS (Flexible Manufacturing System). Το FMS είναι μια μορφή ευέλικτου αυτοματισμού που έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται μεταβαλλόμενες συνθήκες παραγωγής. Χρησιμοποιεί μηχανήματα CNC, ρομπότ για φόρτωση ή εκφόρτωση και συστήματα μεταφοράς υλικών.

Το σύστημα αυτό ελέγχεται από έναν κεντρικό υπολογιστή, έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης πολλαπλών λειτουργιών χωρίς αλλαγή ρύθμισης, αλλαγή της σειράς παραγωγής ή χρήση εναλλακτικών μηχανών σε περίπτωση βλάβης. Επιτυγχάνεται έτσι μεγαλύτερη ποιότητα και παραγωγικότητα ακόμη και μικρών ποσοτήτων και μείωση του χρόνου παραγωγής και του κόστους εργασίας.

Την ίδια εποχή, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα από την ενσωμάτωση των κατεργασιών των NC, CNC, DNS με το λογισμικό CAD για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου, με το λογισμικό CAE που επιτρέπει την ψηφιακή προσομοίωση πριν κατασκευαστεί το φυσικό προϊόν και με το λογισμικό CAM, που μετατρέπει τα σχέδια CAD σε οδηγίες για τις μηχανές, σχεδιάστηκε το CIM (Computer Integrated Manufacturing), το Ολοκληρωμένο Σύστημα Παραγωγής. Το CIM είναι η χρήση υπολογιστικών συστημάτων, συστημάτων επικοινωνίας και λογισμικού που επιτυγχάνουν τη σχεδίαση, το συντονισμό, την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών μέσα σε μια παραγωγική επιχείρηση. Οι ορισμοί FMS και CIM υποδηλώνουν αυτοματοποιημένα διασυνδεδεμένα συστήματα παραγωγής με ευελιξία στις λειτουργίες τους.

3.2 Λειτουργία CNC

Ο παραδοσιακός αριθμητικός έλεγχος (Numerical Control) ορίζει τη χρήση αριθμητικών τιμών για τον πλήρη χειρισμό μιας μηχανής, όπως τη θέση αναφοράς, την κίνηση των αξόνων, την επιλογή των εργαλείων, την ταχύτητα περιστροφής κ.α.. Οι άξονες κίνησης διακρίνονται σε γραμμικούς λόγω της μετατόπισης της πλατφόρμας της φρέζας και σε περιστροφικούς λόγω της περιστροφής του ειδικού εξαρτήματος της φρέζας, του διαιρέτη, ο οποίος επιτρέπει την περιστροφή του αντικειμένου κατεργασίας γύρω από έναν άξονα. Το πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου NC αποτελείται από μια σειρά τέτοιων αριθμητικών τιμών.

Τα σύγχρονα CNC (Computer Numerical Control) έχουν αντικαταστήσει πλήρως τις παλιές μηχανές NC, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και ευελιξία μέσω της χρήσης υπολογιστή. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν την εύκολη διαχείριση συντεταγμένων, την αυτόματη δυναμική αντιστάθμιση των εργαλείων για τη διασφάλιση της ποιότητας, καθώς και τη δυνατότητα δικτύωσης και σύνδεσης με λογισμικά CAD/CAM. Επιπλέον, επιτρέπουν τη γραφική προσομοίωση της κατεργασίας, εξασφαλίζοντας την αποφυγή λαθών πριν από την τελική επεξεργασία.

Η λειτουργία και καθοδήγηση των κινήσεων των μηχανών, πραγματοποιείται με χρήση υπολογιστή που είναι ενσωματωμένος στην εργαλειομηχανή και καλείται μονάδα ελέγχου (MCU). Χρησιμοποιεί αριθμητικές τιμές για την αναφορά στη θέση και την κίνηση των αξόνων της μηχανής, για τον ορισμό των εργαλείων, των στροφών της ατράκτου κλπ. Ο αριθμητικός έλεγχος μέσω υπολογιστή (CNC) δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή να «επικοινωνεί» με την

εργαλειομηχανή και να την «καθοδηγεί» μέσω ενός κώδικα, δηλαδή μιας ακολουθίας γραμμμάτων και αριθμών, που καλούνται εντολές. Οι εντολές αυτές μετατρέπονται σε παλμούς ηλεκτρικού ρεύματος τους οποίους ακολουθούν οι κινητήρες και οι μονάδες ελέγχου της μηχανής έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι μηχανολογικές εργασίες.

Το βασικότερο κίνητρο στην εξέλιξη των εργαλειομηχανών CNC με σύστημα αριθμητικού ελέγχου, συνέθεσε η ανάγκη για υψηλή ακρίβεια στις κατασκευές εξαρτημάτων σύνθετης γεωμετρίας, σε συνάρτηση με την επαναληψιμότητα του αποτελέσματος, όσο και με την ελάττωση του χρόνου κατεργασίας.

Ο τεχνικός της μηχανής CNC ρυθμίζει την ακολουθία των κινήσεων της μηχανής, τις τιμές των συνθηκών της κατεργασίας και χειρίζεται τα κοπτικά εργαλεία. Για όλα αυτά συνθέτει ένα πρόγραμμα καθοδήγησης σε γλώσσα προγραμματισμού που «καταλαβαίνει» η μηχανή, διαβιβάζει τον κώδικα στη μονάδα ελέγχου και το πρόγραμμα εκτελείται από τη μηχανή CNC.

Η κατεργασία CNC προσφέρει μετρήσιμα οφέλη σε επίπεδο αποδοτικότητας λόγω της μείωσης του χρόνου προετοιμασίας για παραγωγή και της αυξημένης παραγωγικότητας. Πολύπλοκες μηχανουργικές κατεργασίες προσφέρουν μικρότερη ανάγκη για επίβλεψη της μηχανής, μεγαλύτερη ασφάλεια και απόδοση του χειριστή και τη δυνατότητα μείωσης του κόστους εργασίας. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα από την αυξημένη χρήση των μηχανών CNC είναι ο περιορισμός του ανθρώπινου σφάλματος, ο μεγάλος βαθμός ακρίβειας και η ελάττωση των άχρηστων υλικών μέσω διαδρομών υψηλής ακρίβειας των εργαλείων και της ακριβούς κοπής.

Ως αντίβαρο σε αυτά τα πλεονεκτήματα, οι μηχανές CNC έχουν υψηλά έξοδα για την αγορά, την συντήρηση, την εγκατάσταση, για την αγορά των εργαλείων και για τον προγραμματισμό τους. Τα σφάλματα προγραμματισμού ή η αστοχία των ρυθμίσεων μπορεί να επηρεάσουν την υψηλή ακρίβεια και τις ανοχές που επιτυγχάνουν. Η απαίτηση για έμπειρους προγραμματιστές που είναι εξοικειωμένοι με τις μηχανουργικές κατεργασίες, τον προγραμματισμό και τη λειτουργία των CNC εργαλειομηχανών, παραμένει καθοριστικής σημασίας για την αποφυγή λαθών και τη διατήρηση της ποιότητας.

Εν κατακλείδι, η επένδυση σε τεχνολογίες CNC, παρά το αρχικό κόστος κτήσης και τη συνεχή ανάγκη για εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα μακροπρόθεσμα. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής μέσω της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας που παρέχουν αυτές οι μηχανές, αποτελεί το πλέον αποτελεσματικό εργαλείο για την επιβίωση και την ανάπτυξη μιας μονάδας παραγωγής στο σύγχρονο, βιομηχανικό περιβάλλον.

3.3 Είδη Φρεζομηχανών

Οι φρεζομηχανές είναι απαραίτητες εργαλειομηχανές στη μηχανουργία για την κατεργασία μετάλλων και άλλων υλικών, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια. Ταξινομούνται σε διάφορα είδη ανάλογα με τη διάταξη της ατράκτου, τον τρόπο λειτουργίας και τον έλεγχο τους. Τα βασικότερα είδη φρεζομηχανών ανά προσανατολισμού του άξονα είναι:

- **Οι κάθετες φρεζομηχανές:** Η κεφαλή, δηλαδή ο άξονας που είναι τοποθετημένο το κοπτικό, είναι τοποθετημένη κάθετα προς την πλατφόρμα της φρέζας. Οι μηχανές αυτές είναι οι πιο συνηθισμένες για κατεργασία επιφανειών και διάνοιξη οπών.
- **Οι οριζόντιες φρεζομηχανές:** Ο άξονας είναι οριζόντιος. Χρησιμοποιούνται κυρίως για δύσκολες κοπές, δημιουργία αυλακώσεων και γραναζιών, δίνοντας καλύτερη απομάκρυνση των γρεζιών.
- **Φρέζες παντός τύπου:** Είναι παρόμοιες με τις οριζόντιες, αλλά διαθέτουν πλατφόρμα που μπορεί να περιστρέφεται, επιτρέποντας την κατεργασία σε διάφορες γωνίες. Επιτρέπουν την κοπή ελικοειδών αυλακώσεων και σύνθετων σχημάτων. Ιδανικές για πολύπλοκα εξαρτήματα.

Οι κατηγορίες ανάλογα με τη δομή και τη χρήση που προορίζεται μια φρεζομηχανή είναι οι εξής:

- ✓ **Φρεζοδράπανα.** Συνδυάζουν τις λειτουργίες της φρέζας και του δραπάνου, ιδανικά για μικρά εργαστήρια και ελαφριές δουλειές.
- ✓ **Σταθερής κλίνης.** Η πλατφόρμα της φρέζας κινείται μόνο κατά μήκος, ενώ ο άξονας κινείται κάθετα. Παρέχουν ακαμψία, ιδανικές για επεξεργασία βαριών τεμαχίων.
- ✓ **Φρεζοπλάνες.** Μεγάλες μηχανές όπου το τεμάχιο προς επεξεργασία κινείται παλινδρομικά, ιδανικές για κατεργασία πολύ μεγάλων επιφανειών.
- ✓ **CNC φρεζομηχανές.** Αυτοματοποιημένες μηχανές που ελέγχονται από υπολογιστή, οι οποίες προσφέρουν εξαιρετική ακρίβεια, ταχύτητα και δυνατότητα αυτοματοποιημένης παραγωγής πολύπλοκων εξαρτημάτων. Μπορούν να έχουν από τρεις έως πέντε άξονες κίνησης.

Επιτραπέζιες ονομάζονται οι CNC φρεζομηχανές που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα τραπέζι λόγω του μικρού μεγέθους τους. Οι επιτραπέζιες ερασιτεχνικές και μικρές φρέζες CNC χρησιμοποιούν αποκλειστικά βηματικούς κινητήρες (stepper motors) για την κίνηση των αξόνων τους, λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας ελέγχου και δεν διαθέτουν μηχανισμό αυτόματης αλλαγής εργαλείου. Οι σύγχρονες βιομηχανικές φρέζες CNC υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας, χρησιμοποιούν σερβοκινητήρες (servo motors) και μύλο αλλαγής κοπτικών εργαλείων, οι οποίες όμως κοστίζουν ακριβά.

Εξειδικευμένοι τύποι φρεζομηχανών είναι:

- ✓ **Φρέζες αντιγραφής:** Χρησιμοποιούνται για την αντιγραφή ενός προτύπου και τη δημιουργία πανομοιότυπου εξαρτήματος.
- ✓ **Περιστρεφόμενου τραπεζιού:** Για κυκλικές κατεργασίες.

Συχνά οι επιτραπέζιες φρέζες CNC συγχέονται με τις μηχανές CNC Routers. Οι CNC Routers είναι σχεδιασμένες για μεγάλες επιφάνειες και για υλικά όπως ξύλο, πλαστικό, αλουμίνιο. Έχουν μεγάλη διαδρομή στους άξονες X και Y, αλλά περιορισμένη στον Z και βασίζονται σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής αλλά με χαμηλή ροπή. Χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε εφαρμογές επιγραφοποιίας και 3D σχεδίων.

Αντιθέτως, οι επιτραπέζιες φρέζες CNC λειτουργούν σε χαμηλότερες στροφές αλλά με μεγαλύτερη ροπή και ιπποδύναμη. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πρωτοτύπων PCB, στην ωρολογιοποιία, για την κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού, για τις κοπές σε μαλακά υλικά όπως φελιζόλ και για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Καλύπτουν τις ανάγκες πολλών επαγγελματιών, όπως των κατασκευαστών κοσμημάτων, αναμνηστικών, ανάγλυφων εικόνων και εκείνων που ασχολούνται με τη χάραξη ή την παραγωγή μικρών ή μεσαίων εξαρτημάτων.



Εικόνα 9: Οι μηχανές CNC Milling (φρέζες) και οι CNC Routers συγχέονται επειδή παρά τις διαφορές τους μοιράζονται ομοιότητες στη λειτουργία και την τεχνολογία.

3.4 Αρχιτεκτονική των Επιτραπέζιων Εργαλειομηχανών

Τα κύρια συστήματα σε μια επιτραπέζια φρέζα αριθμητικού ελέγχου είναι:

i. **Οι άξονες της μηχανής**

Πρόκειται για ανεξάρτητους ευθύγραμμους ή περιστροφικούς μηχανισμούς που κινούν το εργαλείο και το τεμάχιο. Οι μηχανές διακρίνονται σε τριών, τεσσάρων ή πέντε αξόνων. Οι επιτραπέζιες είναι συνήθως τριών αξόνων, με σπανιότερες τις περιπτώσεις τεσσάρων αξόνων ή τη χρήση περιστροφικού διαιρέτη.

ii. **Ο κινητήρας της κύριας ατράκτου**

Κινεί το κοπτικό εργαλείο. Αν και λειτουργεί ανεξάρτητα από τους άξονες κίνησης, είναι ο πιο ισχυρός κινητήρας της μηχανής, καθώς είναι αυτός που διαχειρίζεται τα φορτία κοπής και τις στρεπτικές ροπές.

iii. **Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου**

Χρησιμοποιεί επεξεργαστές και μνήμη για να διαβάσει το πρόγραμμα κοπής, ενώ μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος δίνει τις κατάλληλες εντολές για να κινηθούν οι άξονες με ακρίβεια.

iv. **Ο Η/Υ με το λειτουργικό λογισμικό**

Είναι το περιβάλλον όπου ο χρήστης διαχειρίζεται το πρόγραμμα κοπής, είτε σχεδιάζοντας απευθείας με το ενσωματωμένο CAM είτε εισάγοντας έτοιμα αρχεία από άλλα προγράμματα μέσω post-processor. Επιπλέον ο υπολογιστής επιτρέπει την παρακολούθηση της μηχανής σε πραγματικό χρόνο και τη διαχείριση των σχετικών αρχείων.

Η επιτραπέζια φρέζα CNC αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα μηχανοτρονικής, όπου η συνέργεια των μηχανικών μερών, των ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος και του λογισμικού ελέγχου διασφαλίζει την αυτοματοποιημένη κατεργασία υψηλής ακριβείας. Η κινηματική των αξόνων και ο έλεγχος της θέσης τους βασίζονται σε δύο θεμελιώδεις αρχές ελέγχου: του ανοικτού βρόγχου (open-loop) ή του κλειστού βρόγχου (closed-loop).

3.4.1 Το Σύστημα Ανοικτού Βρόγχου

Το *σύστημα ανοικτού βρόγχου* χρησιμοποιεί βηματικούς κινητήρες για την οδήγηση του κοχλία κίνησης του κάθε άξονα. Κάθε ηλεκτρικός παλμός αναλογεί σε μια συγκεκριμένη γωνία στροφής. Η μονάδα ελέγχου στέλνει την εντολή και ο κινητήρας την εκτελεί. Σε περίπτωση που το κοπτικό βρει μεγάλη αντίσταση, ο κινητήρας ξεπερνάει τα όρια του χωρίς το σύστημα να το αναγνωρίζει και συνεχίζει το πρόγραμμα. Επομένως το τελικό τεμάχιο προς επεξεργασία θα έχει ή λάθος διαστάσεις ή το εργαλείο μπορεί να «χτυπήσει» σε λάθος σημείο, καταστρέφοντας το τεμάχιο. Με λίγα λόγια στο σύστημα ανοικτού βρόγχου ο ελεγκτής «μιλάει» αλλά δεν «ακούει». Το σύστημα ανοικτού βρόγχου χρησιμοποιείται ευρέως σε desktop συστήματα όπως στη μηχανή Wegstr, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της απλότητας του.

3.4.2 Το Σύστημα Κλειστού Βρόγχου

Το *σύστημα κλειστού βρόγχου* χρησιμοποιεί σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος εξοπλισμένους με οπτικούς κωδικοποιητές. Ο κωδικοποιητής «διαβάζει» την πραγματική θέση του άξονα και στέλνει σήμα πίσω (feedback) στον ελεγκτή. Έτσι αν υπάρξει απόκλιση μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θέσης, το σύστημα την διορθώνει ακαριαία. Σε περίπτωση που η διόρθωση είναι αδύνατη, η μηχανή σταματά στιγμιαία, προστατεύοντας το τεμάχιο προς επεξεργασία αλλά και το κοπτικό εργαλείο. Απλουστευμένα εδώ υπάρχει ένας «διάλογος» μεταξύ του κινητήρα και της μονάδας ελέγχου. Το σύστημα κλειστού βρόγχου είναι λιγότερο συνηθισμένο σε σχέση με τον ανοικτό βρόχο. Συναντάτε σε πιο αναβαθμισμένα μοντέλα επιτραπέζιων CNC μηχανών, όπου επιτυγχάνεται επαγγελματική αξιοπιστία σε μικρό μέγεθος.

3.4.3 Κινητήρες Πρόωσης Αξόνων

Οι *κινητήρες πρόωσης αξόνων* (Feed Drive Motors) είναι τα ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα που αναλαμβάνουν την ακριβή μετακίνηση των εργαλείων ή της πλατφόρμας της φρέζας μιας επιτραπέζιας CNC μηχανής κατά μήκος των αξόνων (X,Y,Z κ.τ.λ.). Οι κινητήρες πρόωσης πρέπει να πληρούν τις παρακάτω αυστηρές προδιαγραφές:

- Ταχύτατη μεταβολή στροφών χωρίς ταλαντώσεις. Στην πράξη ο κινητήρας πρέπει να μπορεί να επιταχύνει και να επιβραδύνει ακαριαία, «υπακούοντας» στις εντολές του συστήματος ελέγχου. Όταν ο άξονας φτάσει στην επιθυμητή θέση ή ταχύτητα, σταματά ακριβώς εκεί, χωρίς να κάνει μικρές ταλαντώσεις μέχρι να ισορροπήσει. Η κίνηση δεν είναι απότομη ή σπασμωδική, κάτι που προστατεύει τα μηχανικά μέρη και εξασφαλίζει ότι το κοπτικό εργαλείο δεν θα αφήσει σημάδια στο επεξεργαζόμενο τεμάχιο.
- Υψηλή πιστότητα κίνησης, ανεξάρτητα από την αντίσταση του επεξεργαζόμενου τεμαχίου, τις τριβές ή τις αδρανειακές δυνάμεις. Είτε το εργαλείο φρεζάρει ή κόβει ένα μαλακό υλικό είτε ένα σκληρό υλικό, οι άξονες πρέπει να κινούνται με την ίδια ακριβώς ταχύτητα που τους ζητήθηκε, χωρίς να επιβραδύνουν λόγω της αντίστασης. Ακόμα και αν οι οδηγοί ολίσθησης, τα μηχανικά εξαρτήματα πάνω στα οποία «πατάνε» και κινείται το κινητό μέρος μιας μηχανής, η πλατφόρμα, έχει τριβή, οι κινητήρες πρέπει να την υπερνικούν ακαριαία ώστε η μετατόπιση να είναι ακριβής μέχρι και στο χιλιοστό του χιλιοστού. Έτσι ώστε αν ζητηθεί από το μηχάνημα να πάει σε ένα σημείο πολλές φορές επιβάλλεται όλες τις φορές να σταματήσει ακριβώς στο ίδιο σημείο, χωρίς καμία απόκλιση.
- Μεγάλες ταχύτητες εν κενώ, όταν το εργαλείο πάει από το ένα σημείο στο άλλο χωρίς να φρεζάρει ή να κόβει, να μπορεί να πηγαίνει όσο το δυνατόν πιο γρήγορα γίνεται. Όταν όμως το εργαλείο φρεζάρει ή κόβει η κίνηση πρέπει να είναι ομαλή, ο κινητήρας να μην κάνει απότομες αλλαγές γιατί αυτές θα αποτυπωθούν στο τεμάχιο. Αν η κίνηση δεν είναι σταθερή, η επιφάνεια του επεξεργαζόμενου τεμαχίου θα βγει τραχιά.

3.4.3.1 Τύποι Κινητήρων

Οι κύριοι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούνται για την κίνηση των αξόνων (πρόωση) στις επιτραπέζιες μηχανές CNC είναι οι παρακάτω:

Βηματικοί κινητήρες (Stepper Motors): Κινούνται κατά ένα βήμα για κάθε παλμό που δέχονται χωρίς να απαιτείται σύστημα ανάδρασης για τον έλεγχο τους. Έτσι ο έλεγχος της θέσης αλλά και της ταχύτητας να γίνεται πιο απλός σε επίπεδο ελέγχου αριθμού και ρυθμού παλμών. Δεν χρειάζονται συντήρηση, είναι σχετικά οικονομικοί, έχουν υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες και εξαιρετική ακρίβεια θέσης χωρίς πολύπλοκα ηλεκτρονικά. Παρόλα αυτά υπό μεγάλο φορτίο υπάρχει πιθανότητα απώλειας των βημάτων και μειωμένη απόδοση σε υψηλές ταχύτητες, οπότε είναι πιθανόν να απαιτηθεί κιβώτιο ταχυτήτων ή αναστροφέας συχνότητας (inverter).

Σερβοκινητήρες (Servo Motors): Προτιμώνται σε βιομηχανικές μηχανές CNC υψηλών προδιαγραφών, επειδή η ροπή είναι σταθερή, άρα η ισχύς αυξάνεται ανάλογα με τις στροφές, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια και μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Λειτουργούν σε κλειστό βρόχο χρησιμοποιώντας κωδικοποιητές για συνεχή έλεγχο της θέσης τους. Ελαχιστοποιείται η συντήρηση αλλά ανεβαίνει το κόστος και η παραμετροποίηση γίνεται πιο σύνθετη.

3.4.4 Κινητήρας Κύριας Ατράκτου (Spindle)

Ισοδύναμης βαρύτητας ρόλο με τους άξονες κίνησης μιας CNC επιτραπέζιας εργαλειομηχανής έχει και ο ηλεκτροκινητήρας κύριας ατράκτου (Spindle Motor), το εξάρτημα που κινεί το εργαλείο μιας φρέζας. Αν και λειτουργεί ανεξάρτητα από τους άξονες κίνησης, είναι ο πιο ισχυρός κινητήρας του μηχανήματος, καθώς είναι αυτός που διαχειρίζεται τα φορτία και τις ροπές κατά τη διάρκεια του φρεζαρίσματος ή της κοπής. Στον κινητήρα αυτό βασικές απαιτήσεις είναι η υψηλή ισχύς, το μεγάλο εύρος στροφών και η σταθερότητα της ταχύτητας περιστροφής παρά τις μεταβολές του φορτίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως κινητήρες συνεχούς ρεύματος ή τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες, με την τελική επιλογή να εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και τον όγκο της παραγωγής.

3.4.4.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC Drives)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) χρησιμοποιούνται συχνά σε επιτραπέζιες εργαλειομηχανές CNC λόγω του χαμηλού κόστους τους και του απλού ελέγχου των ηλεκτρονικών τους κυκλωμάτων. Προσφέρουν υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές και εύκολο έλεγχο ταχύτητας μέσω απλών κυκλωμάτων. Ωστόσο, παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα λόγω της χρήσης ψηκτρών, οι οποίες απαιτούν συχνή συντήρηση και προκαλούν θόρυβο. Επιπλέον, εμφανίζουν αστάθεια σε πολύ χαμηλές ταχύτητες και περιορισμούς στις υψηλές, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο ακριβείς.

3.4.4.2 Τριφασικοί Ασύγχρονοι Κινητήρες

Οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούν την επικρατέστερη επιλογή για την άτρακτο (spindle) των βιομηχανικών εργαλειομηχανών. Το κύριο πλεονέκτημά τους έγκειται στην απουσία ψηκτρών, καθώς η μεταφορά ισχύος στον ρότορα επιτυγχάνεται μέσω επαγωγής, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις ανάγκες συντήρησης και αυξάνει την αξιοπιστία. Ο έλεγχος των στροφών πραγματοποιείται με ακρίβεια μέσω μετατροπών συχνότητας, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή στις απαιτήσεις της κατεργασίας. Οι άτρακτοι κατηγοριοποιούνται με βάση τη δυνατότητα εναλλαγής των εργαλείων σε συστήματα: σταθερού κώνου, χειροκίνητης γρήγορης αλλαγής και αυτόματης αλλαγής.

3.4.5 Το Ηλεκτρονικό Σύστημα Ελέγχου της Επιτραπέζιας Φρέζας CNC

Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου μιας επιτραπέζιας φρέζας CNC το οποίο απαρτίζεται από έναν αριθμό μικροεπεξεργαστών, μνήμης (RAM & ROM) και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μετατρέπει τις ψηφιακές οδηγίες σε φυσική κίνηση με υψηλή ακρίβεια. Αποτελείται από μια σειρά αλληλένδετων στοιχείων που διασφαλίζουν τον συντονισμό των αξόνων και του κοπτικού εργαλείου. Μπορεί να περιλαμβάνει και διάφορα περιφερειακά για την εκτύπωση αρχείων και την παρακολούθηση της λειτουργίας της φρέζας.

3.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [3.1] **Ελεκίδης, Α. (2022).** Τεχνικές βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε διεργασίες συνεχούς και διαλείπουσας λειτουργίας [Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Ανάλυσης Σχεδιασμού και Ρύθμισης των Χημικών Διεργασιών και Εγκαταστάσεων]. Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών.
- [3.2] **Γ. Βοσνιακός:** Σημειώσεις Μαθήματος «Εργαλειομηχανές» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα 2008
- [3.3] **Νεκτάριος Βιδάκης, Αριστομένης Αντωνιάδης :** Σημειώσεις Μαθήματος «Εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση» ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ – Τμήμα Μηχανολογίας . Σεπτέμβριος 2004
- [3.4] Techno Inc. CNC Router Systems: Technical Section manual <http://www.techno-isel.com>
- [3.5] -, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Society of Manufacturing Engineers, McGraw-Hill, New York, 1976
- [3.6] **Κριμπένης, Α. (2021).** Παρουσίαση στο μάθημα “Εργαλειομηχανές CNC & Προγραμματισμός”. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

4.1 Διαδικασία Υλοποίησης των Στόχων της Εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξοικείωση με την πλήρη ροή των εργασιών για την κατασκευή πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων PCB, χρησιμοποιώντας σύγχρονα εργαλεία λογισμικού και το μηχανολογικό εξοπλισμό ακριβείας, τη φρέζα CNC Wegstr. Για την επίτευξη των στόχων υλοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες:

- Εγκατάσταση και έναρξη πραγματικής λειτουργίας της επιτραπέζιας φρέζας 3 αξόνων Wegstr CNC του Εργαστηρίου Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS), του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Δεδομένου ότι το Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων διαθέτει τον ίδιο ακριβώς εξοπλισμό, η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει έναν ολοκληρωμένο οδηγό χρήσης και αναφοράς που θα παραχωρηθεί στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής του εν λόγω τμήματος, ενισχύοντας τη διατμηματική συνεργασία και την τεχνογνωσία πάνω στο συγκεκριμένο μηχάνημα.
- Εξοικείωση με τον πλήρη κύκλο σχεδίασης (End to End PCB Design) στο περιβάλλον του cloud λογισμικού EasyEDA Pro. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη σύνταξη του σχηματικού διαγράμματος με χρήση εκτενών βιβλιοθηκών εξαρτημάτων. Τη χωροθέτηση και δρομολόγηση της πλακέτας (PCB Layout & Routing). Την επαλήθευση μέσω προσομοίωσης και τον έλεγχο κανόνων (DRC- Design Rule Check). Την τρισδιάστατη 3D οπτικοποίηση για τον έλεγχο της μηχανικής συμβατότητας. Και την εξαγωγή των αρχείων σχεδιασμού Gerber και Excellon, τα οποία αποτελούν την είσοδο για το λογισμικό CAM.
- Εκπαίδευση και εκμάθηση του δωρεάν ανοιχτού κώδικα λογισμικού FlatCam, γραμμένο σε Python, ειδικά σχεδιασμένο για την προετοιμασία της μηχανικής χάραξης (PCB milling) από την εργαλειομηχανή Wegstr CNC. Το FlatCam εισάγει αρχεία που προέρχονται από προγράμματα σχεδίασης PCB και εξάγει αρχεία με τις ακριβείς συντεταγμένες G-Codes και εντολές κίνησης M-Codes, για τη χάραξη των διαδρομών, τη διάτρηση των οπών και την κοπή του περιγράμματος της πλακέτας.
- Κατασκευή δοκιμαστικής πλακέτας για την αποτίμηση της αποδιδόμενης ακρίβειας από την μηχανή CNC Wegstr.

4.2 Εγκατεστημένος Εξοπλισμός στο Εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS)

Το εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS) καλύπτει διδακτικές και ερευνητικές ανάγκες με αντικείμενο την Ηλεκτρονική και την Αρχιτεκτονική Υπολογιστών, δηλαδή τη σχεδίαση, ανάπτυξη και κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων/συστημάτων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων/συστημάτων πολύ υψηλής κλίμακας ολοκλήρωσης (κυκλώματα/συστήματα VLSI) καθώς και την αρχιτεκτονική των υπολογιστικών συστημάτων. Το εργαστήριο έχει σαν αποστολή την κάλυψη των διδακτικών και ερευνητικών αναγκών σε προπτυχιακό, μεταπτυχιακό, διδακτορικό και μεταδιδακτορικό επίπεδο, καθώς και σε προγράμματα διά βίου μάθησης, του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής. (ΦΕΚ Θεσμοθέτησης Εργαστηρίου 2192/15-07-2016 τ. Β’).

4.3 Επιτραπέζια Φρέζα 3 Αξόνων Wegstr CNC

4.3.1 Hardware

Το Εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS), συμπληρώνει στον εξοπλισμό του, για την κατασκευή πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (PCB), τη φρέζα Wegstr CNC. Η εν λόγω εργαλειομηχανή είναι επιτραπέζια CNC φρέζα 3 αξόνων, κατασκευή της Τσέχικης εταιρίας WEGSTR s.r.o., που ειδικεύεται αποκλειστικά στην κατασκευή συμπαγών επιτραπέζιων εργαλειομηχανών CNC υψηλής ακρίβειας. Οι μηχανές αυτές είναι σχεδιασμένες κυρίως για εργασίες πρωτοτυποποίησης, χάραξης και κατασκευής πλακετών (PCB) σε περιβάλλοντα με περιορισμένο χώρο, όπως είναι τα σχολεία, τα εργαστήρια ή τα γραφεία.

Είναι μια σχετικά χαμηλού κόστους μηχανή ($\approx 3.200,0$ €) με απλά μηχανικά και ηλεκτρονικά μέρη, που όμως με την κατάλληλη αξιοποίηση μπορεί να αποκτήσει ενδιαφέρουσες δυνατότητες και προοπτικές ειδικά όσον αφορά την κατασκευή πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (PCB).



Εικόνα 10: Η επιτραπέζια φρέζα Wegstr CNC.

4.3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Μηχανής Wegstr CNC

Η επιτραπέζια φρέζα Wegstr CNC Εικόνα 10 ζυγίζει μόλις 7 κιλά, καθιστώντας την πλήρως φορητή και έχει συνολικές διαστάσεις 380πλάτοςx460μήκοςx290ύψος mm, γεγονός που την καθιστά ικανή να τοποθετηθεί ακόμα και σε ένα απλό σταθερό τραπέζι. Οπωσδήποτε, βέβαια, είναι προτιμότερο να τοποθετείται σε ένα μικρών διαστάσεων βαρέως τύπου τραπέζι για την αποφυγή κραδασμών, όπως πολύ σωστά είναι τοποθετημένη στο Εργαστήριο Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS).

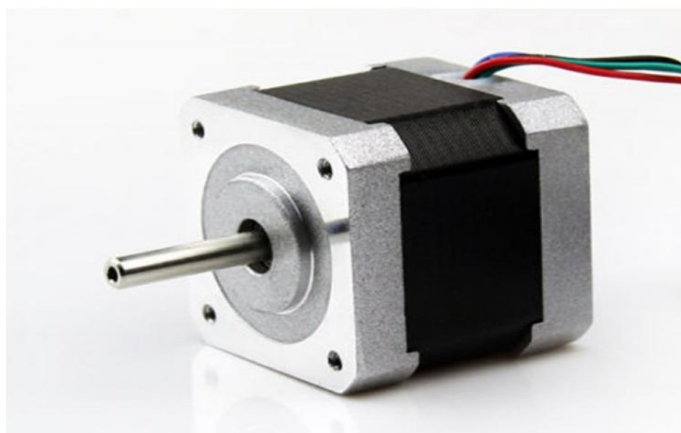
Η τάση λειτουργίας της είναι στα 100-240V AC, συχνότητας 50/60Hz και καταναλώνει συνολικά περίπου 30W, γεγονός που επιβεβαιώνει τον σχεδιασμό της ως επιτραπέζια μηχανή που δεν απαιτεί ειδικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις ρεύματος, με την άτρακτο (spindle) να καταναλώνει 25W. Η κεφαλή Εικόνα 11 είναι τύπου Brushless DC (BLDC). Η επιλογή αυτή γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ βιομηχανικής ισχύος και εργαστηριακής ευελιξίας, καθώς οι BLDC κινητήρες προσφέρουν την ίδια φιλοσοφία "μηδενικής συντήρησης", λόγω απουσίας ψηκτρών,

προσφέροντας υψηλότερη ροπή, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μικρότερο βάρος και πιο αθόρυβη λειτουργία. Η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου είναι σταθερή 11.000 rpm και η διάμετρος της οπής της ατράκτου για τη συγκράτηση του εργαλείου είναι 3,175 mm. Η μέγιστη ταχύτητα πρόωσης με την οποία το κοπτικό εργαλείο μετακινείται κατά μήκος της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι και για τους 3 άξονες στα 170 mm/min.



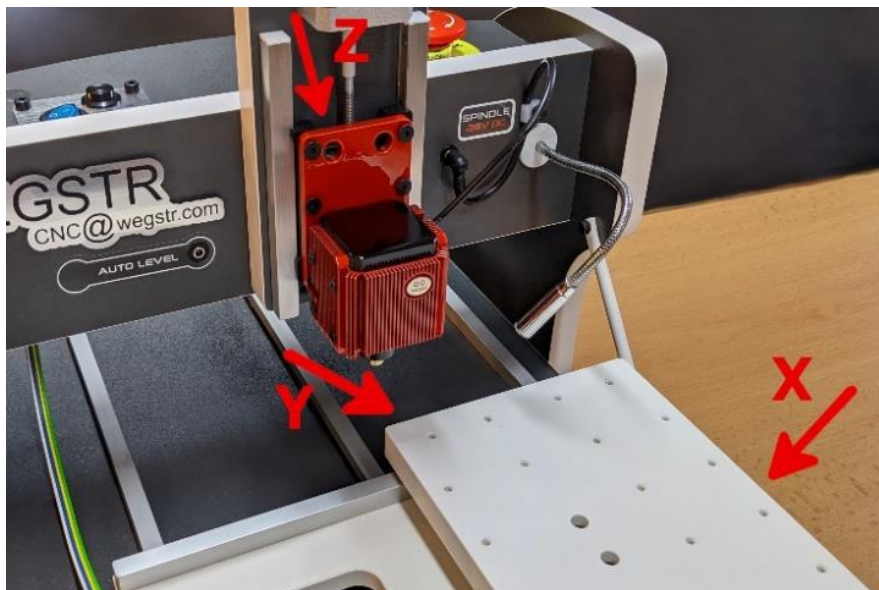
Εικόνα 11: Η κεφαλή (spindle) της επιτραπέζια φρέζα Wegstr CNC.

Η μηχανή Wegstr CNC έχει τρεις βηματικούς κινητήρες (Stepper Motors) Εικόνα 12 έναν για κάθε άξονα: X, Y, Z. Κάθε βήμα του βηματικού κινητήρα αντιστοιχεί σε 4μm ή 0.004 mm, αφορά την ακρίβεια τοποθέτησης του εργαλείου σε μια συγκεκριμένη συντεταγμένη X, Y, Z πάνω στην επιφάνεια του προς επεξεργασία τεμαχίου. Αυτή η ακρίβεια επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού του βηματικού κινητήρα και του κοχλίας (μια ράβδος με σπείρωμα) υψηλής ακρίβειας που μετατρέπουν την περιστροφή σε γραμμική κίνηση. Καθώς ο κινητήρας γυρίζει, ο κοχλίας περιστρέφεται μέσα σε ένα παξιμάδι που είναι στερεωμένο στο κινούμενο μέρος της φρέζας. Έτσι, η περιστροφή γίνεται γραμμική μετατόπιση. Η υψηλή αυτή ανάλυση επιτρέπει στην φρέζα Wegstr CNC να χαράζει εξαιρετικά λεπτές γραμμές σε πλακέτες PCB. Όσο μικρότερο είναι το βήμα, τόσο πιο λεία είναι η κίνηση στις καμπύλες και τις διαγώνιες γραμμές, αποφεύγοντας τα «δοντάκια» που αφήνουν οι λιγότερο ακριβείς μηχανές.



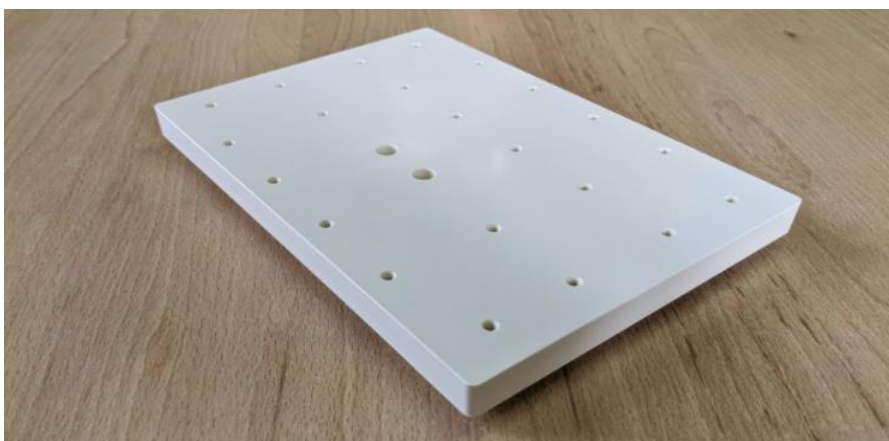
Εικόνα 12: Βηματικός κινητήρας (Stepper Motor) της επιτραπέζια φρέζα Wegstr CNC.

Η επαναληψιμότητα της μηχανής είναι 0,02 mm, χάρη στους μηχανικούς οδηγούς και το στιβαρό πλαίσιο της συσκευής. Οι μηχανικοί οδηγοί (linear rails) Εικόνα 13 αποτελούν το σύστημα γραμμικής έδρασης της φρέζας. Πρόκειται για ράγες ακριβείας που επιτρέπουν την ολίσθηση των κινουμένων μερών με ελάχιστη τριβή και μηδενικά πλευρικά διαστήματα, εξασφαλίζοντας ότι η κίνηση παραμένει σταθερή και ακριβής υπό το φορτίο της κατεργασίας. Αυτό είναι σημαντικό όταν δουλεύει η μηχανή σε πολλά στάδια π.χ. πρώτα φρεζάρει και μετά τρυπάει, η μηχανή επιστρέφει ακριβώς στο ίδιο σημείο όσες φορές και αν της ζητηθεί. Έτσι αν κατασκευαστούν 10 ίδια τεμάχια, το πρώτο τεμάχιο θα είναι πρακτικά πανομοιότυπο με το δέκατο τεμάχιο.



Εικόνα 13: Οι μηχανικοί οδηγοί (linear rails) της επιτραπέζια φρέζα Wegstr CNC.

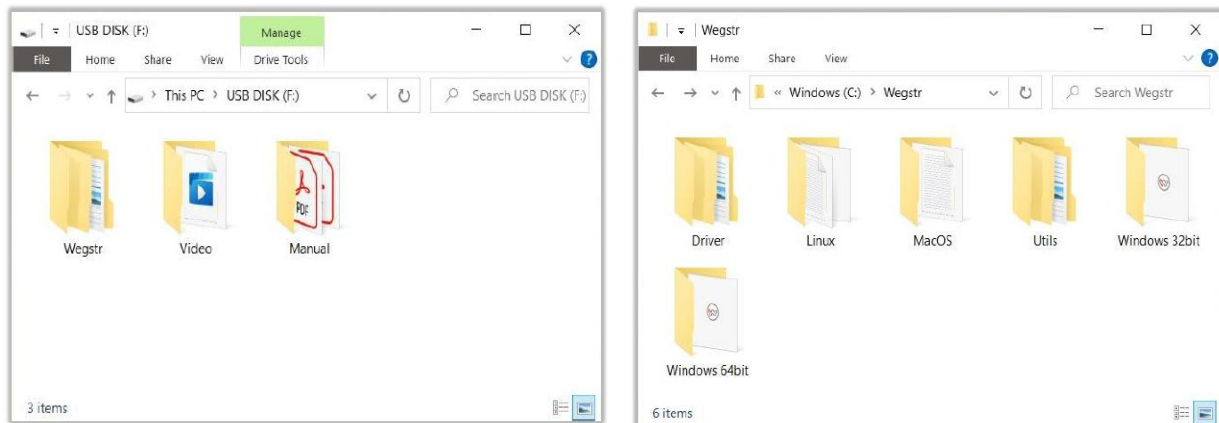
Η επιφάνεια κατεργασίας (Εικόνα 14) είναι 140μήκοςx200πλάτος mm, καθιστώντας την ιδανική για τη χάραξη και κατασκευή πλακετών (PCB). Η φρέζα υποστηρίζει αυτόματη ανίχνευση μήκος εργαλείου και επιθεώρηση της επιφάνειας του κατεργαζόμενου εργαλείου εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη χάραξη. Αν και η μέγιστη διαδρομή του άξονα Z στη μηχανή αυτή είναι περιορισμένη στα 40 mm επιτρέπει την επεξεργασία μιας ποικιλίας υλικών όπως plexiglass, MDF, FR4 (PCB), μαλακά και σκληρά πλαστικά, ξύλο καθώς και μέταλλα όπως αλουμίνιο, χαλκό, ορείχαλκο, ακόμη ασήμι ή χρυσό.



Εικόνα 14: Η επιφάνεια κατεργασίας (work plate) της επιτραπέζια φρέζα Wegstr CNC.

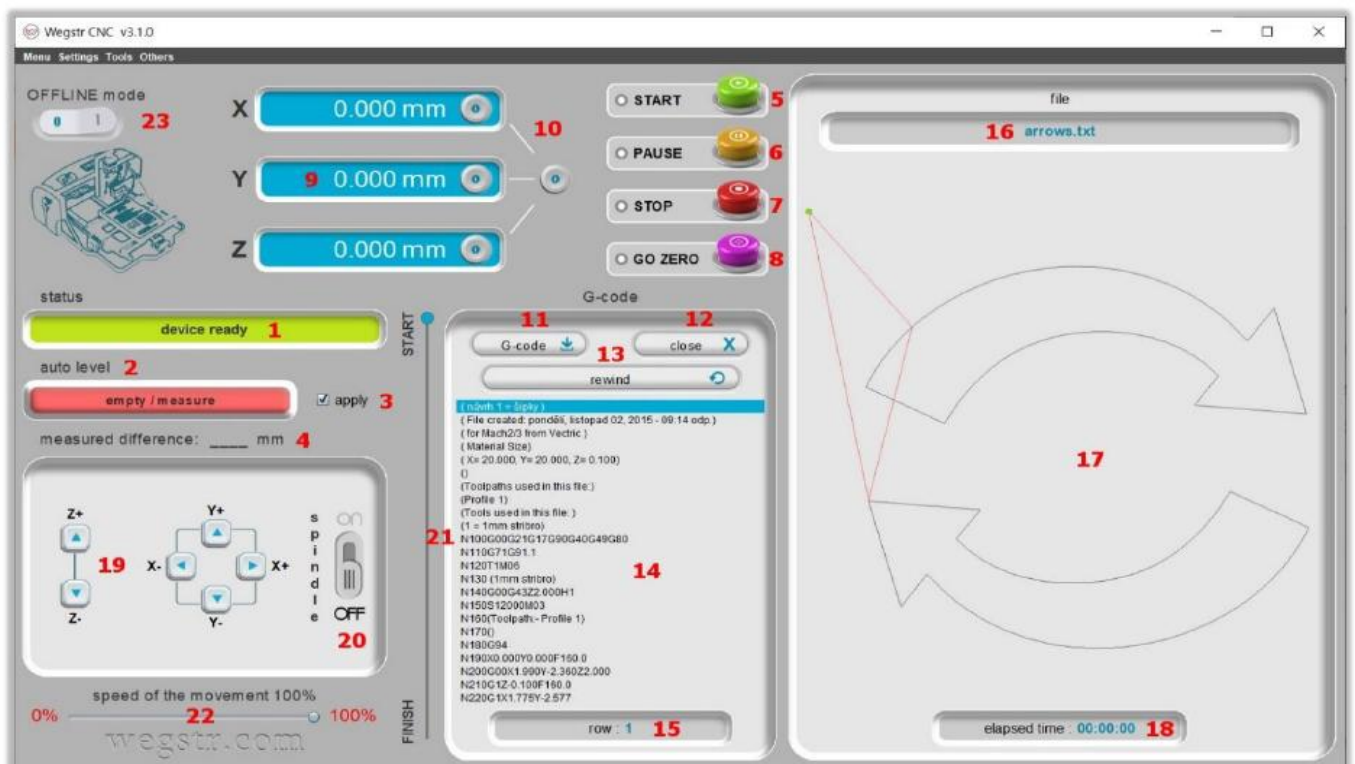
4.3.3 Το Λογισμικό της Φρέζας Wegstr CNC

Το λογισμικό της φρέζας Wegstr CNC (Εικόνα 16) παρέχεται με το μηχάνημα και εγκαθίσταται στον υπολογιστή από το USB flash. Είναι απαραίτητη η αντιγραφή του φακέλου «Wegstr» στον τοπικό δίσκο του υπολογιστή και η εγκατάσταση του κατάλληλου προγράμματος οδήγησης για το μηχάνημα από τον φάκελο (Driver). Η εφαρμογή εκτελείται με κλικ στο «Wegstr.exe» από τον κατάλληλο φάκελο. Το λογισμικό προστασίας από ιούς μπορεί να εκτελέσει έλεγχο, πριν το άνοιγμα του αρχείου.



Εικόνα 15: Στιγμιότυπα από την εγκατάσταση του λογισμικού της επιτραπέζιας φρέζας Wegstr.

Στην παρακάτω Εικόνα 16 δίνονται οι αριθμητικοί σύνδεσμοι με τις εξηγήσεις να ακολουθούν.



Εικόνα 16: Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού της επιτραπέζιας φρέζας Wegstr CNC.

1. Τρέχουσα κατάσταση του μηχανήματος.
 2. Τρέχουσα κατάσταση και έλεγχος της λειτουργίας αυτόματης ισοστάθμισης (auto level). Η μηχανή χρησιμοποιεί το κοπτικό εργαλείο ως αισθητήρα για να "ψηλαφήσει" την επιφάνεια του υλικού σε διάφορα σημεία. Καθώς καμία επιφάνεια δεν είναι απόλυτα επίπεδη (ειδικά οι λεπτές πλακέτες χαλκού), το λογισμικό καταγράφει τις μικροδιαφορές στο ύψος, ώστε η χάραξη να έχει παντού το ίδιο βάθος.
 3. Όταν το κουμπί είναι τσεκαρισμένο η μηχανή χρησιμοποιεί τις μετρούμενες τιμές της αυτόματης ισοστάθμισης.
 4. Δείχνει την απόκλιση ύψους σε χιλιοστά (mm) μεταξύ του χαμηλότερου και του υψηλότερου σημείου που ανίχνευσε η μηχανή στην επιφάνεια του υλικού π.χ. μιας πλακέτας.
 5. Έναρξη της εργασίας.
 6. Παύση της εργασίας που εκτελείται ή της λειτουργίας της αυτόματης στάθμισης.
 7. Διακοπή λειτουργίας του μηχανήματος σε κάθε περίπτωση.
 8. Επιστροφή στις μηδενικές θέσεις.
 9. Τρέχουσες θέσεις της ατράκτου για τους άξονες X, Y και Z (κάνοντας κλικ στο εσωτερικό ενεργοποιείται η χειροκίνητη ενημέρωση των τιμών).
 10. Επαναφορά της θέσης X, Y ή Z, ξεχωριστά ή όλων των αξόνων μαζί.
 11. Φόρτωση του πηγαίου κώδικα G.
 12. Κλείσιμο της εργασίας σε εξέλιξη.
 13. Επιστροφή της εργασίας σε εξέλιξη στην αρχική της κατάσταση (η εργασία πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση διακοπής ή ολοκλήρωσης).
 14. Λεπτομερής λίστα του φορτωμένου G-code.
 15. Τρέχουσα γραμμή του G – Code της εργασίας σε εξέλιξη, όταν τοποθετείται ο κέρσορας πάνω από το κείμενο εμφανίζεται ο συνολικός αριθμός των γραμμών και με κλικ στο εσωτερικό ενεργοποιείται η χειροκίνητη ενημέρωση της τιμής.
 16. Όνομα της εργασίας σε εξέλιξη, τοποθετώντας τον κέρσορα στο κείμενο εντοπίζεται η πλήρης διαδρομή του αρχείου.
 17. Σχέδιο της εργασίας σε εξέλιξη.
 18. Χρόνος που έχει παρέλθει από την εργασία που εκτελείται ή το αυτόματο επίπεδο.
 19. Χειροκίνητος έλεγχος και των τριών αξόνων.
 20. Έλεγχος της ατράκτου.
 21. Συνολική πρόοδος της εργασίας σε εξέλιξη.
 22. Ρύθμιση του ρυθμού πρόωσης και για τους τρεις άξονες (ισχύει για προβολή, αυτόματη χωροστάθμιση και χειροκίνητο έλεγχο).
 23. Λειτουργία εκτός σύνδεσης για σκοπούς δοκιμής της εφαρμογής χωρίς το μηχάνημα.
- Περισσότερες πληροφορίες για το λογισμικό της Wegstr καθώς και για την εκκίνηση του λογισμικού σε Windows, σε MacOS και σε Linux, ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει από την κατασκευάστρια εταιρεία ή από τις τεχνικές πληροφορίες που παρατίθενται στο Εγχειρίδιο Οδηγιών (Instruction Manual) της κατασκευάστριας εταιρείας.

4.4 Το Λογισμικό EasyEDA Pro

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ως κύριο λογισμικό σχεδίασης CAD το EasyEDA Pro, καθώς αποτελεί μια σύγχρονη και αποδοτική λύση για το σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και πλακετών PCB. Προτιμήθηκε έναντι της Standard έκδοσης επειδή προσφέρει αναβαθμισμένες δυνατότητες απόδοσης και διαχείρισης, όπως αναλύεται και πιο κάτω.

Το EasyEDA Pro είναι ιδανικό για επαγγελματίες που ασχολούνται με σύνθετα έργα (projects) με πολλές στρώσεις (layers) αλλά και για όσους απαιτούν υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα. Η έκδοση Pro χρησιμοποιεί μηχανή WebGL, μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί την κάρτα γραφικών του χρήστη, επιτρέποντας τον σχεδιασμό μεγάλων και σύνθετων πλακετών PCB, χωρίς καθυστερήσεις (lag). Σε αντίθεση με την έκδοση Standard που χρησιμοποιεί τεχνολογία SVG, ως εκ τούτου όταν η πλακέτα γίνει μεγάλη υπάρχει καθυστέρηση στο σχεδιασμό.

Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την σχεδίαση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων προσφέρει τρεις καταστάσεις λειτουργίας. Την Full Online cloud αποθήκευση, την Half Offline τοπική αποθήκευση με πρόσβαση σε cloud βιβλιοθήκες και την Full Offline λειτουργία για απόλυτη ιδιωτικότητα. Όπως και η Standard έκδοση, η Pro έκδοση παραμένει συνδεδεμένη με την βιβλιοθήκη της εταιρείας κατασκευής πλακετών JLCPCB και της εταιρείας διανομών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων LCSC. Επίσης προσφέρει ένα σύνολο εργαλείων για σχολιασμό και κριτική των κυκλωμάτων σε πραγματικό χρόνο για την επικοινωνία μελών μιας ομάδας.

Η έκδοση Pro διαφέρει από την Standard έκδοση στην διαχείριση των εξαρτημάτων. Στο EasyEDA Pro εισάγεται η έννοια του «Device» όπου ένα εξάρτημα είναι μια ενιαία οντότητα που περιλαμβάνει το σύμβολο (Symbol), το αποτύπωμα (Footprint), το 3D Model και τις ιδιότητες του (π.χ. τιμή, κατασκευαστής). Στο EasyEDA Standard σχεδιάζονται σχήματα, ενώ στο EasyEDA Pro μόνο συσκευές «Devices» επιτρέπεται να τοποθετηθούν στο σχηματικό, διασφαλίζοντας ότι κάθε εξάρτημα είναι πλήρως ορισμένο. Με άλλα λόγια η Standard έκδοση είναι σαν η αγορά ενός επίπλου σε κομμάτια όπου πρέπει να συναρμολογηθούν από τον αγοραστή, ενώ η Pro έκδοση είναι σαν η αγορά ενός επίπλου συναρμολογημένου στο κουτί του. Επιπρόσθετα η Pro έκδοση διαθέτει οδηγό (Wizard) εξαρτημάτων (Footprint/Symbol Wizard) που δημιουργεί αυτόματα το σχέδιο ενός εξαρτήματος.

Μια ακόμη βασική διαφορά της Standard έκδοσης από την Pro έκδοση εντοπίζεται στον ιεραρχικό σχηματικό σχεδιασμό, με τα μπλοκ επαναχρησιμοποίησης (Reuse Blocks) σε σημεία του ίδιου project ή σε διαφορετικά projects. Έτσι εξοικονομείται χρόνος στη σχεδίαση, μειώνονται σχεδιαστικά σφάλματα αφού χρησιμοποιούνται κυκλώματα που έχουν ήδη ελεγχθεί, ιδανικά για την απόδοση κυκλωμάτων με πανομοιότυπα τμήματα (π.χ. σε σήματα υψηλής συχνότητας).

Στην Pro έκδοση υπάρχει ενσωματωμένο εργαλείο για τη σύγκριση δύο εκδόσεων ενός PCB (PCB Comparison), για εντοπισμό των διαφορών στη σχεδίαση. Το εργαλείο αυτό τοποθετεί τη μία πλακέτα πάνω στην άλλη και φωτίζει με έντονο χρώμα τις τυχόν αλλαγές. Εντοπίζει μικροδιαφορές και βγάζει μια λίστα με το τι τροποποιήθηκε, τι προστέθηκε και τι διαγράφηκε. Η Pro έκδοση διαθέτει ενσωματωμένη την αυτόματη δρομολόγηση των γραμμών (tracks). Από το μενού Route -> Auto Routing χωρίς επιπλέον εγκατάσταση, σε αντίθεση με την Standard έκδοση όπου η δρομολόγηση γίνεται από ένα εξωτερικό αρχείο.

Ενώ το EasyEDA Standard σχεδιάζει μόνο την πλακέτα (PCB), στο EasyEDA Pro μπορεί να σχεδιαστεί και το εξωτερικό περίβλημα ή η πρόσοψη μιας συσκευής (Panel Design). Διαθέτει επίσης ειδικά εργαλεία για προσθήκη ενισχύσεων (Stiffeners) σε εύκαμπτα PCB (FPC) πλακέτες που υπάρχουν μέσα σε κινητά ή laptop. Η Pro έκδοση διαθέτει ειδικό layer (επίπεδο σχεδίασης) για το σχεδιασμό της ενίσχυσης που μπορεί να είναι ένα σκληρό κομμάτι πλαστικού (FR4 ή Kapton) ή μέταλλο.

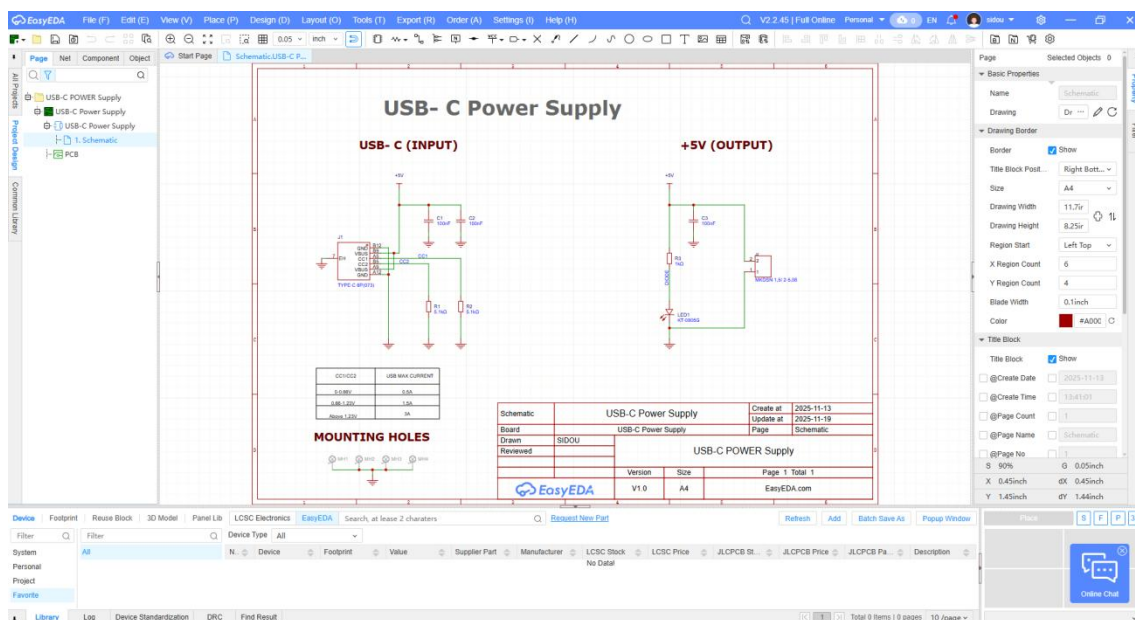
Εισαγωγή έργων (projects) από τη Standard στην Pro έκδοση υποστηρίζεται, ενώ συμβατότητα από την Pro πίσω στην Standard έκδοση δεν υποστηρίζεται, λόγω της διαφορετικής δομής των αρχείων. Το EasyEDA Pro προσφέρει μια εμπειρία «all-in-one» γεγονός που επιταχύνει τη μετάβαση από τις αυστηρές γεωμετρίες στις ελεύθερες επιφάνειες, όπου μη επακριβώς μαθηματικά και γεωμετρικά περιγράψιμες μορφές σχεδιάζονται, επιτυγχάνοντας απόλυτη ακρίβεια της κατασκευής.

Ακολουθεί η παρουσίαση του σχεδιαστικού περιβάλλοντος, που βασίζεται σε πραγματικά στιγμιότυπα. Μέσω αυτών, επεξηγούνται οι δυνατότητες παραμετροποίησης των βιβλιοθηκών, η

διαχείριση των ηλεκτρικών δικτύων και οι αυτοματοποιημένοι έλεγχοι σχεδίασης (DRC), εξασφαλίζοντας μια σαφή εικόνα των δυνατοτήτων του λογισμικού σε πραγματικές συνθήκες σχεδίασης.

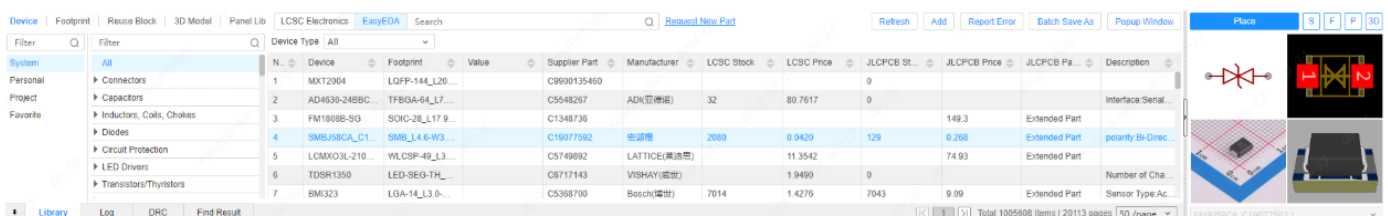
4.4.1 Σύντομη Περιγραφή της Σχηματικής Σχεδίασης - Schematic Design στο EasyEDA Pro

Η σχηματική σχεδίαση (Schematic Design), βλ. Εικόνα 17, αποτελεί το πρώτο βασικό στάδιο για τη δημιουργία τυπωμένων κυκλωμάτων PCB, καθώς ορίζεται η λογική του κυκλώματος. Σύνθετα κυκλώματα δημιουργούνται μέσω ιεραρχικών σχηματικών. Πλούσια βιβλιοθήκη εξαρτημάτων παρέχει έτοιμα σχηματικά σύμβολα. Περιλαμβάνει εργαλεία για την τοποθέτηση κειμένου, γραφικών στοιχείων, αγωγών και δικτύων. Επιτρέπει τον ηλεκτρικό έλεγχο κανόνων (ERC), διασφαλίζοντας ότι οι συνδέσεις είναι ηλεκτρικά ορθές, πριν τη μετατροπή του σχηματικού σε PCB. Η διαδικασία της μετατροπής του σχηματικού σε PCB και το αντίστροφο είναι άμεση, με τη λειτουργία “Update PCB”, όπου οι αλλαγές διατηρούνται συγχρονισμένες και στα δύο αρχεία.



Εικόνα 17: Το γραφικό περιβάλλον της σχηματικής σχεδίασης του EasyEDA Pro.

Η γραμμή εργαλείων στο περιβάλλον της σχηματικής σχεδίασης παρουσιάζει λειτουργική αναλογία με εκείνη της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB), προσφέροντας ένα κοινό περιβάλλον διαχείρισης των βασικών εντολών του λογισμικού.

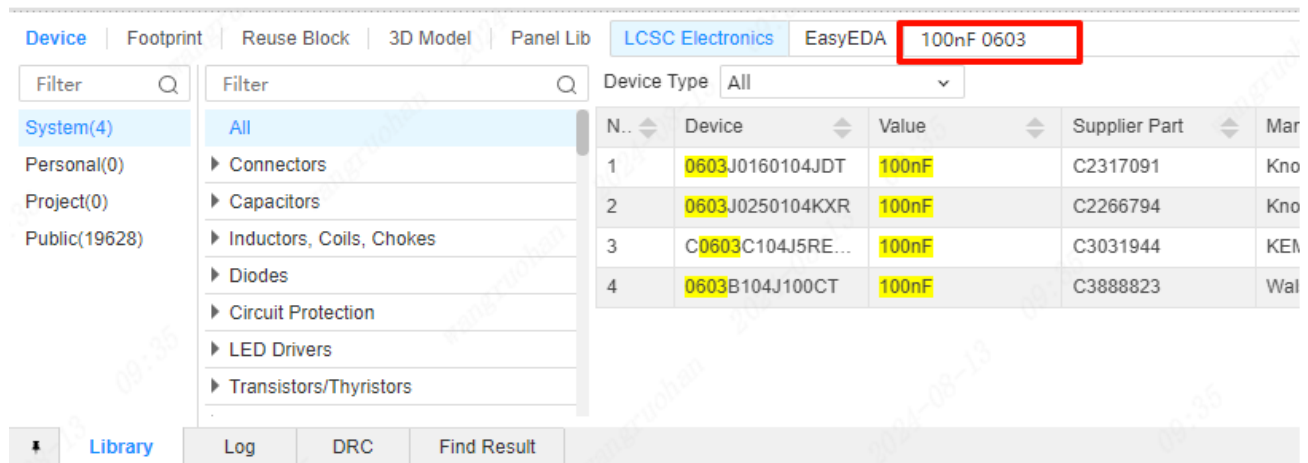


Εικόνα 18: Διεπαφή της κεντρικής βιβλιοθήκης συστήματος (System Library) στο EasyEDA Pro και ενοποιημένο παράθυρο επιλογής εξαρτημάτων.

Στο κάτω μέρος της διεπαφής χρήστη ενσωματώνεται η καρτέλα της βιβλιοθήκης Library (Εικόνα 18) η οποία παρέχει μια πολυεπίπεδη πρόσβαση σε εξαρτήματα (Devices) από διάφορες πηγές:

- Από την συστηματική βιβλιοθήκη (System Library), η οποία λειτουργεί ως μια κεντρική, επαληθευμένη βάση δεδομένων που ενσωματώνει τη φιλοσοφία του "Device". Παρέχει στον σχεδιαστή άμεση πρόσβαση σε πλήρεις βιβλιοθήκες εξαρτημάτων (σύμβολο, αποτύπωμα και 3D μοντέλο), διασφαλίζοντας τη συμβατότητα μεταξύ της σχηματικής σχεδίασης και της φυσικής υλοποίησης στην πλακέτα.
- Από την εμπορική βιβλιοθήκη (LCSC), σε άμεση διασύνδεση με τον κατάλογο της LCSC Electronics για την επιλογή εξαρτημάτων με διαθέσιμα τεχνικά φυλλάδια και τιμές.
- Από ιδιωτικές βιβλιοθήκες (Personal Team), με πρόσβαση σε εξατομικευμένα εξαρτήματα του χρήστη ή της ομάδας εργασίας.
- Από τοπικές βιβλιοθήκες του έργου (Project), για άμεση διαχείριση των εξαρτημάτων που έχουν ήδη εισαχθεί στο τρέχον έργο (project).

Η οργάνωση αυτή επιτρέπει την ταχεία εύρεση και τοποθέτηση στοιχείων, διασφαλίζοντας ότι κάθε εξάρτημα συνοδεύεται από το σωστό σχηματικό σύμβολο και το αντίστοιχο αποτύπωμα (footprint).



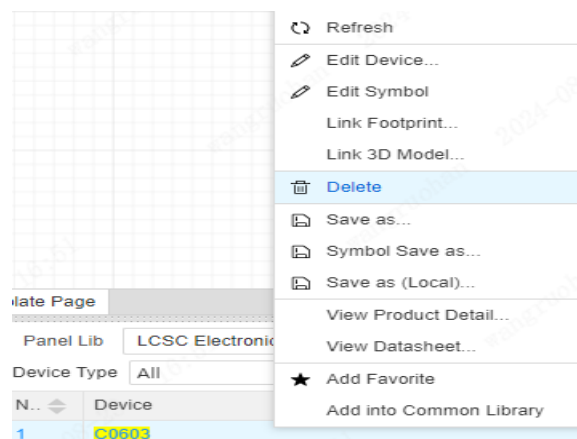
Εικόνα 19: Χρησιμοποίηση φίλτρου για την εύρεση εξαρτημάτων στην ενότητα LCSC Electronics του EasyEDA Pro.

Στην Εικόνα 19 έχει εισαχθεί ο όρος αναζήτησης "100nF 0603", στοχεύοντας σε πυκνωτές συγκεκριμένης χωρητικότητας και μεγέθους περιβλήματος (SMD 0603). Το σύστημα επιστρέφει μια λίστα συμβατών συσκευών (Devices) από τη βάση δεδομένων της LCSC, με στοιχεία όπως τον μοναδικό κωδικό προμηθευτή και τον κατασκευαστή. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την άμεση διασύνδεση της σχεδίασης με τον κατάλογο υλικών, διευκολύνοντας την επιλογή εξαρτημάτων με βάση την ακριβή τεχνική τους περιγραφή και τη διαθεσιμότητά τους στην αγορά.



Εικόνα 20: Αναζήτηση στη βιβλιοθήκη προσωπικών συσκευών ανά κατηγορία.

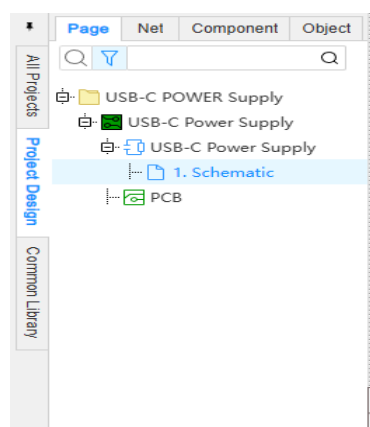
Στην Εικόνα 20 απεικονίζεται η διαδικασία εντοπισμού αποθηκευμένων εξαρτημάτων μέσα από την προσωπική βάση δεδομένων του χρήστη. Με τη χρήση του όρου αναζήτησης "capacitor" (πυκνωτής) στο πεδίο φιλτραρίσματος, το λογισμικό απομονώνει τα σχετικά αρχεία, εμφανίζοντας στην προκειμένη περίπτωση το εξάρτημα με την ονομασία "C0603". Η δυνατότητα αυτή είναι θεμελιώδης για τη διαχείριση εξατομικευμένων εξαρτημάτων που έχουν δημιουργηθεί ή τροποποιηθεί από τον ίδιο τον σχεδιαστή, επιτρέποντας την ταχεία ανάκτηση και επαναχρησιμοποίησή τους σε διαφορετικά έργα (projects).



Εικόνα 21: Μενού επιλογών για την επεξεργασία και διαχείριση εξαρτημάτων (Devices) στην προσωπική βιβλιοθήκη του EasyEDA Pro.

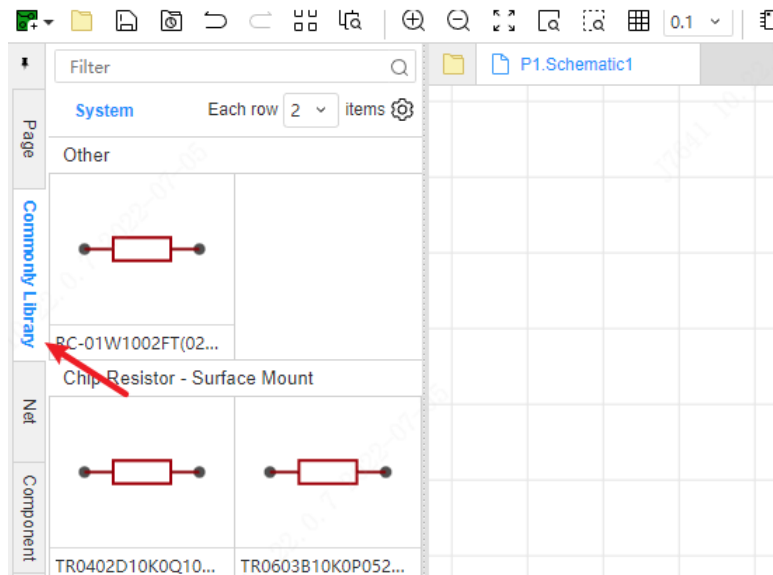
Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 21 απεικονίζονται οι διαθέσιμες λειτουργίες επεξεργασίας για ένα αποθηκευμένο εξάρτημα (στην προκειμένη περίπτωση, ενός πυκνωτή με περίβλημα C0603). Μέσω του αναδυόμενου μενού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα πλήρους παραμετροποίησης του εξαρτήματος, συμπεριλαμβανομένης της τροποποίησης του ηλεκτρικού συμβόλου (Edit Symbol), της σύνδεσης με νέα αποτυπώματα (Link Footprint) ή τρισδιάστατα μοντέλα (Link 3D Model). Επιπλέον, παρέχονται επιλογές για την οργάνωση της βιβλιοθήκης, όπως η προσθήκη στα αγαπημένα (Add Favorite) ή η ενσωμάτωση στη βιβλιοθήκη συχνών εξαρτημάτων (Add into Common Library), προσφέροντας απόλυτο έλεγχο στα δεδομένα της σχεδίασης.

Στα αριστερά της σχηματικής σχεδίασης (Schematic Design), βρίσκονται οι καρτέλες Common Library, Project Design, Net, Component και Object.



Εικόνα 22: Το αριστερό μέρος του περιβάλλοντος σχηματικής σχεδίασης (Schematic Design) στο EasyEDA Pro.

Στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο της καρτέλας Project Design (Εικόνα 22) παρουσιάζεται η δομή του έργου με την ονομασία "USB-C POWER Supply". Η ιεραρχική οργάνωση επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό των επιμέρους στοιχείων: το φάκελο του έργου, το κύριο αρχείο σχεδίασης και τα υποκείμενα έγγραφα, όπως η σελίδα του σχηματικού διαγράμματος (1. Schematic) και η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει την άμεση πρόσβαση και τον συγχρονισμό μεταξύ της θεωρητικής σύλληψης (Schematic) και της φυσικής υλοποίησης (PCB), ενώ οι επάνω καρτέλες (Page, Net, Component, Object) προσφέρουν πρόσθετα επίπεδα φιλτραρίσματος για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων του έργου.

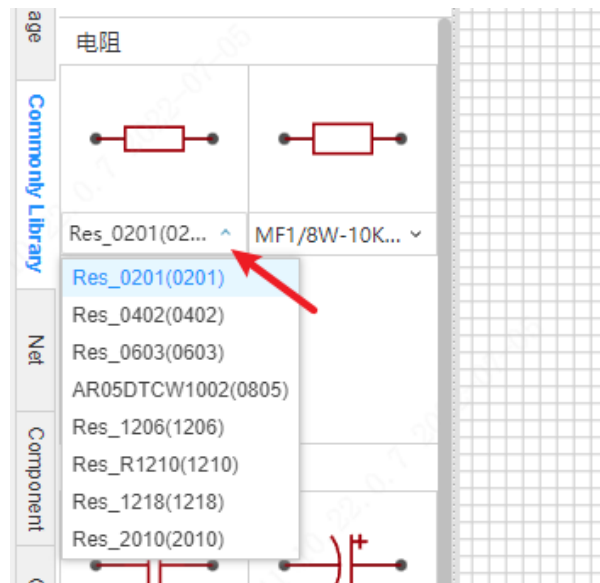


Εικόνα 23: Διεπαφή της βιβλιοθήκης συνηθισμένων εξαρτημάτων (Commonly Library) στο περιβάλλον σχηματικής σχεδίασης του EasyEDA Pro.

Στην Εικόνα 23 απεικονίζεται η καρτέλα Commonly Library, η οποία λειτουργεί ως μια εργαλειοθήκη ταχείας πρόσβασης για εξαρτήματα γενικής χρήσης. Η διεπαφή επιτρέπει την άμεση οπτική επιλογή συμβόλων, όπως οι αντιστάσεις επιφανειακής στήριξης (Chip Resistors), ενώ παρέχει τη δυνατότητα παραμετροποίησης της προβολής (π.χ. ρύθμιση αντικειμένων ανά σειρά). Η χρήση αυτής της βιβλιοθήκης επιταχύνει σημαντικά τη σχεδιαστική διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει προ-επιλεγμένα υλικά με ήδη αντιστοιχισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και αποτυπώματα, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για την επαναλαμβανόμενη αναζήτηση βασικών εξαρτημάτων.

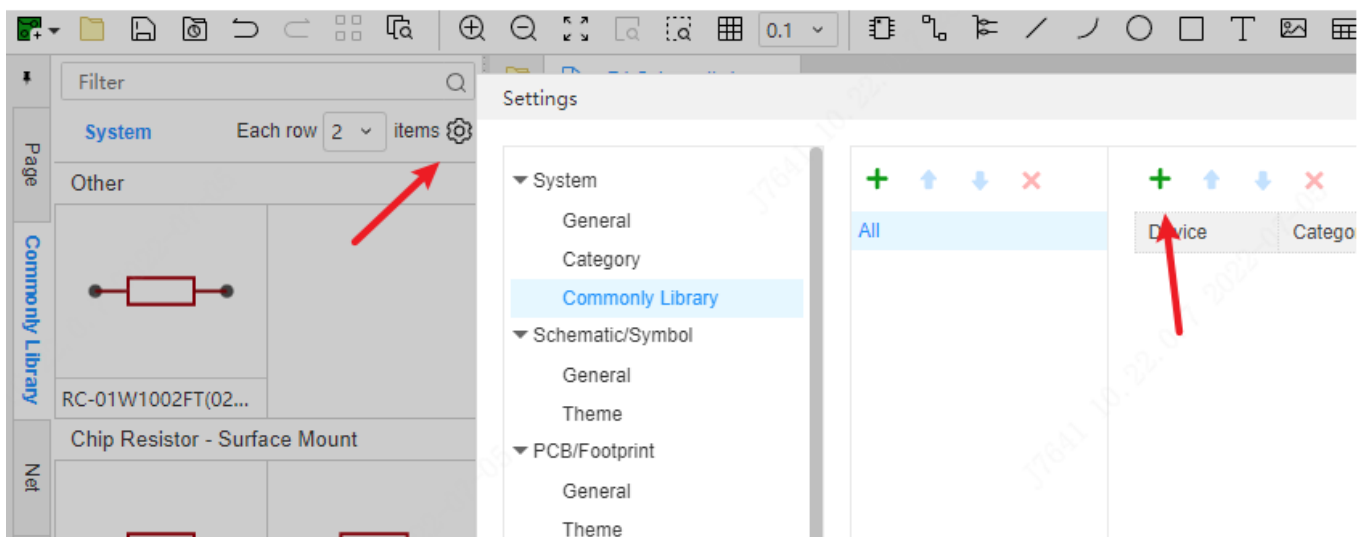
Η καρτέλα Common Library λειτουργεί ως ένα δυναμικό αποθετήριο συχνά χρησιμοποιούμενων στοιχείων (όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, γειώσεις και πηγές τροφοδοσίας). Η δυνατότητα αυτή επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία σχεδίασης, επιτρέποντας την άμεση τοποθέτηση των βασικών δομικών στοιχείων του κυκλώματος χωρίς την ανάγκη αναζήτησης στην πλήρη βάση δεδομένων.

Η συστηματική χρήση της Common Library διασφαλίζει την ομοιομορφία των συμβόλων σε ολόκληρη την έκταση του σχεδίου. Χρησιμοποιώντας τυποποιημένα σύμβολα για κοινά εξαρτήματα (όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και διόδους), αποφεύγεται η ανάμειξη διαφορετικών σχεδιαστικών στυλ που συχνά προκύπτουν από τη χρήση πολλαπλών βιβλιοθηκών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα καθαρό και ευανάγνωστο σχηματικό διάγραμμα, το οποίο ακολουθεί τα διεθνή πρότυπα και διευκολύνει την αποσφαλμάτωση (debugging) αλλά και τη μετέπειτα μελέτη του κυκλώματος από τρίτους.



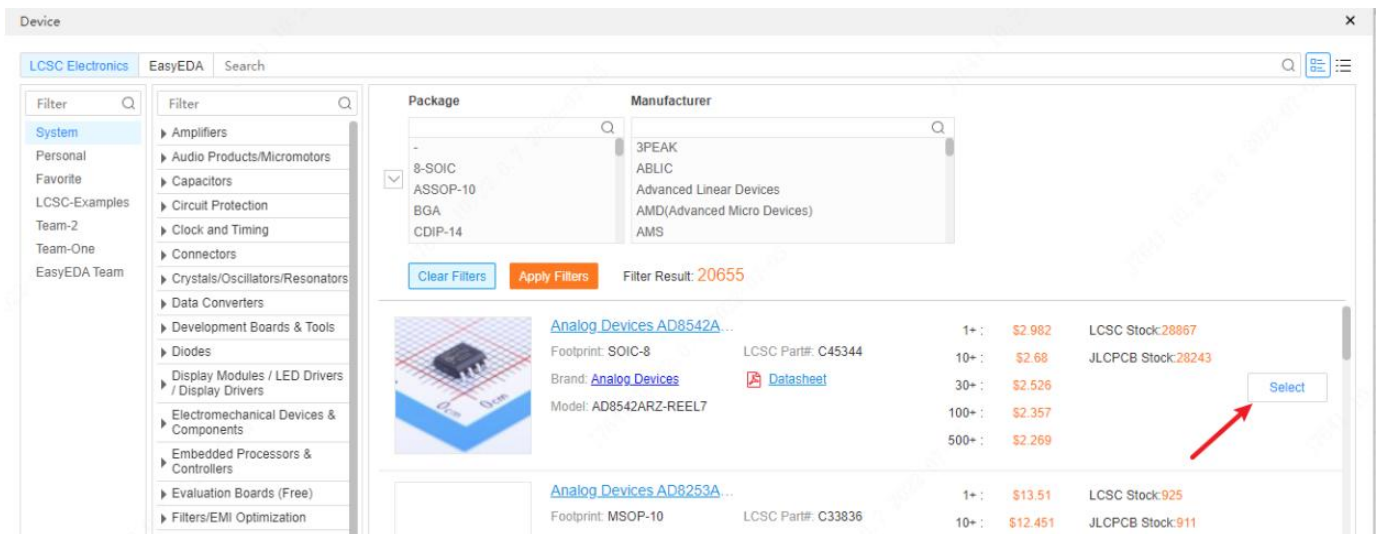
Εικόνα 24: Εναλλαγή μοντέλων στην καρτέλα Common Library.

Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 24 απεικονίζεται η δυνατότητα ταχείας εναλλαγής μεταξύ διαφορετικών μεγεθών περιβλήματος για ένα εξάρτημα (στην προκειμένη περίπτωση, μιας αντίστασης). Μέσω του αναπτυσσόμενου μενού, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει το επιθυμητό μέγεθος SMD, από 0201 έως 2010, εξασφαλίζοντας ότι το σχηματικό σύμβολο θα αντιστοιχιστεί αυτόματα με το σωστό αποτύπωμα (footprint) στην πλακέτα. Η λειτουργία αυτή απλοποιεί τη σχεδίαση, καθώς επιτρέπει την αλλαγή της φυσικής διάστασης του εξαρτήματος χωρίς να απαιτείται η διαγραφή και επανατοποθέτηση του συμβόλου στο ηλεκτρικό σχέδιο.



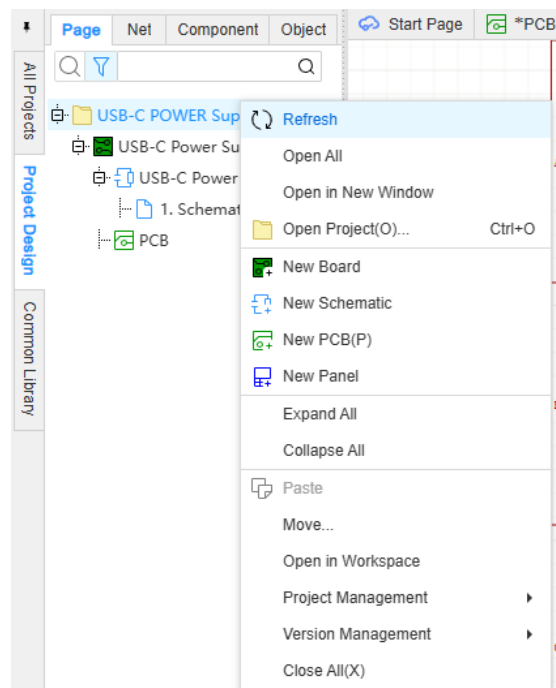
Εικόνα 25: Διεπαφή ρυθμίσεων και εξατομίκευσης της βιβλιοθήκης συχνά χρησιμοποιούμενων εξαρτημάτων (Commonly Library) στο EasyEDA Pro.

Στην Εικόνα 25 μέσω του εικονιδίου των ρυθμίσεων (γρανάζι), ο χρήστης αποκτά πρόσβαση στο παράθυρο διαχείρισης, όπου επιτρέπεται η προσθήκη, αφαίρεση και ιεράρχηση συγκεκριμένων εξαρτημάτων (Devices). Η λειτουργία αυτή ενισχύει την αποδοτικότητα της σχεδίασης, επιτρέποντας την οργάνωση εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται συχνά.



Εικόνα 26: Διαδικασία αναζήτησης και παραμετρικού φιλτραρίσματος εξαρτημάτων στην πλατφόρμα EasyEDA Pro μέσω της βάσης δεδομένων LCSC Electronics.

Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 26 απεικονίζεται η χρήση προηγμένων φίλτρων αναζήτησης για τον εντοπισμό ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος (στην προκειμένη περίπτωση, του τελεστικού ενισχυτή AD8542A της Analog Devices). Ο σχεδιαστής μπορεί να φιλτράρει τα αποτελέσματα βάσει τύπου περιβλήματος (Package, π.χ. 8-SOIC) και κατασκευαστή (Manufacturer). Η διεπαφή παρέχει άμεση πρόσβαση στο Datasheet, πληροφορίες για το απόθεμα και κλιμακωτή τιμολόγηση, ενώ το κόκκινο βέλος υποδεικνύει το πλήκτρο Select για την οριστική εισαγωγή του εξαρτήματος στο έργο. Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει ότι το επιλεγμένο υλικό πληροί τόσο τις τεχνικές προδιαγραφές όσο και τους περιορισμούς διαθεσιμότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας.

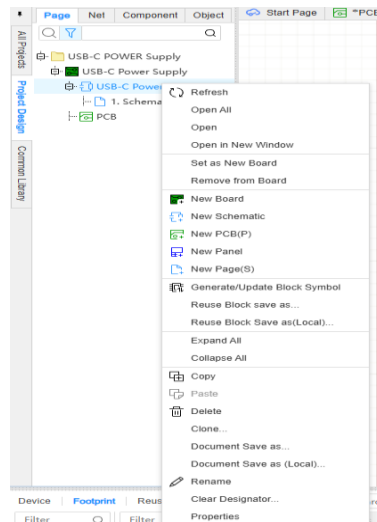


Εικόνα 27: Το αναδυόμενο μενού διαχείρισης αρχείων στο EasyEDA Pro.

Η καρτέλα Project Design στην Εικόνα 27 αποτελεί το κεντρικό πεδίο ελέγχου του έργου, παρέχοντας μια δομημένη προβολή όλων των σχετικών αρχείων. Σε αυτήν περιλαμβάνονται:

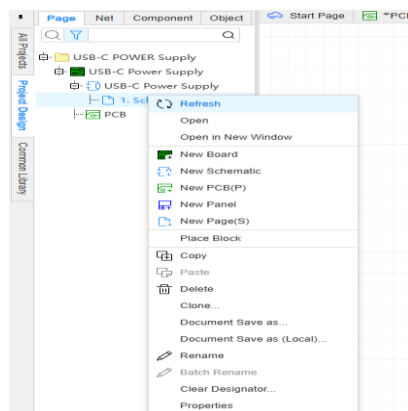
- Οι σελίδες του σχηματικού (Schematic Pages), οι οποίες μπορεί να είναι πολλαπλές σε περίπτωση ιεραρχικής σχεδίασης.
- Τα αρχεία PCB, όπου πραγματοποιείται η φυσική χωροθέτηση των εξαρτημάτων.
- Τα αρχεία Panel Design, τα οποία επιτρέπουν τον σχεδιασμό του εξωτερικού περιβλήματος ή της διάταξης πολλαπλών πλακετών σε ένα ενιαίο πάνελ.

Η ιεραρχική αυτή οργάνωση διευκολύνει την πλοήγηση μεταξύ των διαφορετικών σταδίων της σχεδίασης και εξασφαλίζει ότι όλα τα δεδομένα παραμένουν αρχειοθετημένα κάτω από την ίδια ενότητα.



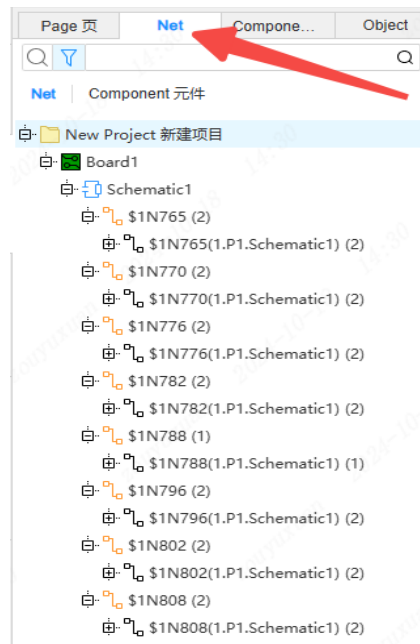
Εικόνα 28: Διαθέσιμες λειτουργίες διαχείρισης μέσω του κεντρικού μενού.

Στην παραπάνω Εικόνα 28 παρέχεται η δυνατότητα πλήρους ελέγχου της σχέσης μεταξύ σχηματικού και πλακέτας. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει το τρέχον σχηματικό σε μια νέα πλακέτα ή να το αποσυνδέσει, καθιστώντας το ανεξάρτητο. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η λειτουργία "Generate/Update Block Symbol", η οποία υποστηρίζει τη δημιουργία επαναχρησιμοποιήσιμων ενοτήτων (Reuse Blocks). Αυτό επιτρέπει τη δομοστοιχειωτή σχεδίαση ιεραρχικών κυκλωμάτων, όπου δοκιμασμένα υποκυκλώματα μπορούν να εισαχθούν αυτούσια σε νέα projects, εξασφαλίζοντας ταχύτητα και αξιοπιστία. Παράλληλα, η υποστήριξη λειτουργιών αντιγραφής και επικόλλησης εγγράφων μεταξύ διαφορετικών έργων ενισχύει την ευελιξία στη διαχείριση της σχεδιαστικής πληροφορίας.



Εικόνα 29: Το ιεραρχικό δέντρο του project και το αναδυόμενο μενού διαχείρισης αρχείων στο EasyEDA Pro.

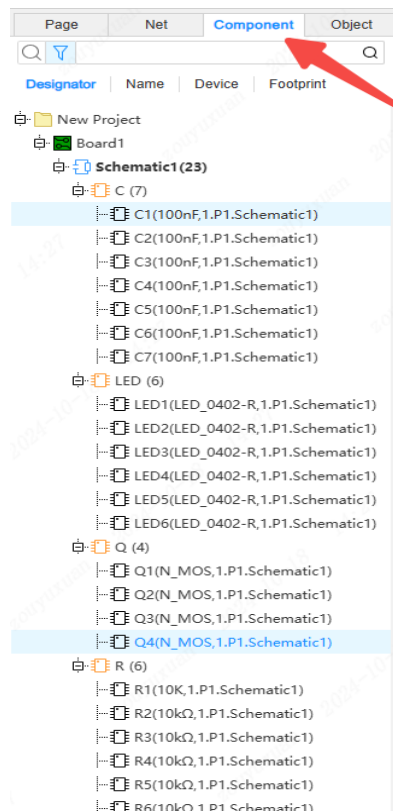
Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 29 απεικονίζεται η δομή ενός υπό ανάπτυξη project και οι διαθέσιμες λειτουργίες διαχείρισης αρχείων. Μέσω του αναδυόμενου μενού, ο σχεδιαστής μπορεί να εκτελέσει ενέργειες όπως η προσθήκη νέων σελίδων σχηματικού (New Page), νέων πλακετών (New PCB) ή πάνελ (New Panel), διευκολύνοντας την κλιμάκωση του project. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λειτουργίες Clone και Document Save as (Local), οι οποίες εξασφαλίζουν την ευελιξία στη διαχείριση εκδόσεων και την ασφάλεια των δεδομένων της σχεδίασης, επιτρέποντας στον χρήστη να διατηρεί τοπικά αντίγραφα της εργασίας του.



Εικόνα 30: Η καρτέλα Net.

Η καρτέλα Net, όπως απεικονίζεται στο παραπάνω στιγμιότυπο της Εικόνα 30, παρέχει μια ιεραρχική προβολή όλων των ηλεκτρικών συνδέσεων του κυκλώματος. Εμφανίζονται όλα τα δίκτυα (nets), όπως τα αυτόματα παραγόμενα ονόματα (π.χ. \$1N765, \$1N770), καθώς και ο αριθμός των συνδέσεων που περιλαμβάνει το καθένα (αναγράφεται στην παρένθεση). Αναλύεται σε ποια σελίδα του σχηματικού (π.χ. Schematic1) και σε ποιους ακριβώς ακροδέκτες αντιστοιχεί κάθε δίκτυο. Η λειτουργία αυτή είναι καθοριστική για την επαλήθευση της συνδεσιμότητας (Connectivity Check). Επιτρέπει στον σχεδιαστή να εντοπίσει γρήγορα δίκτυα με μία μόνο σύνδεση (όπως το \$1N788 στην εικόνα), γεγονός που υποδεικνύει πιθανό σφάλμα παράλειψης σύνδεσης, διασφαλίζοντας την ορθότητα της πλακέτας πριν αυτή αποσταλεί για κατασκευή στη φρέζα CNC.

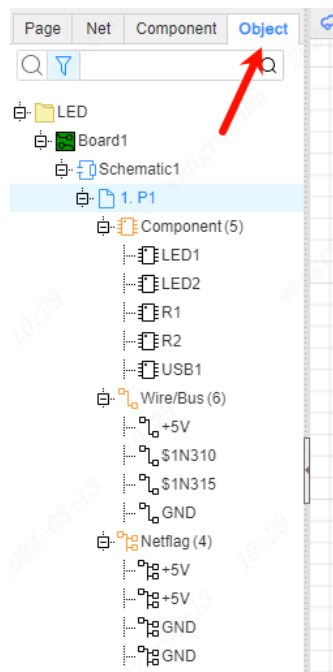
Η καρτέλα Net παρέχει μια λεπτομερή ιεραρχική αναπαράσταση όλων των ηλεκτρικών δικτύων (nets) του κυκλώματος. Μέσω αυτής, ο σχεδιαστής μπορεί να παρακολουθεί τον συνολικό αριθμό των δικτύων, καθώς και τους συγκεκριμένους ακροδέκτες (pins) που ανήκουν σε κάθε δίκτυο. Η δυνατότητα αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την επαλήθευση της συνδεσιμότητας και τον εντοπισμό τυχόν "ασύνδετων" δικτύων (unconnected nets) πριν τη μεταφορά του σχεδίου στο PCB. Επιπλέον, επιτρέπει τη γρήγορη πλοήγηση σε συγκεκριμένα τμήματα του κυκλώματος, επιλέγοντας το αντίστοιχο δίκτυο απευθείας από τη λίστα.



Εικόνα 31: Η καρτέλα Component.

Η καρτέλα Component στο στιγμιότυπο της Εικόνας 31, παρέχει μια δομημένη καταγραφή των εξαρτημάτων που περιλαμβάνονται στο έργο. Τα εξαρτήματα ομαδοποιούνται αυτόματα βάσει του τύπου τους (π.χ. C για πυκνωτές, LED, Q για τρανζίστορ και R για αντιστάσεις), εμφανίζοντας τον συνολικό αριθμό ανά κατηγορία. Για κάθε στοιχείο παρέχονται πληροφορίες όπως ο προσδιοριστής (Designator), η τιμή ή το μοντέλο, καθώς και η σελίδα του σχηματικού στην οποία εντοπίζεται. Η λειτουργία αυτή είναι καθοριστική για τον έλεγχο της πληρότητας του σχεδίου και τη γρήγορη πλοήγηση σε συγκεκριμένα υλικά εντός σύνθετων κυκλωμάτων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επαλήθευση των footprints πριν την παραγωγή των αρχείων για τη φρέζα Wegstr, διασφαλίζοντας ότι όλα τα εξαρτήματα (όπως τα 0402 LED της εικόνας) έχουν το σωστό μέγεθος για τη μηχανική χάραξη.

Η καρτέλα Component λειτουργεί ως ένας δυναμικός κατάλογος όλων των δομικών στοιχείων που έχουν ενσωματωθεί στο σχηματικό. Παρέχει τη δυνατότητα ομαδοποίησης των εξαρτημάτων με βάση τον τύπο (π.χ. αντιστάσεις, ολοκληρωμένα) ή την ποσότητα, διευκολύνοντας τον άμεσο εντοπισμό και την πλοήγηση σε συγκεκριμένα σημεία του κυκλώματος. Η εποπτεία αυτή είναι απαραίτητη για τον έλεγχο της πληρότητας του σχεδίου και αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία της Κατάστασης Υλικών (Bill of Materials - BOM), η οποία απαιτείται για την προμήθεια των εξαρτημάτων μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της πλακέτας στη φρέζα CNC.



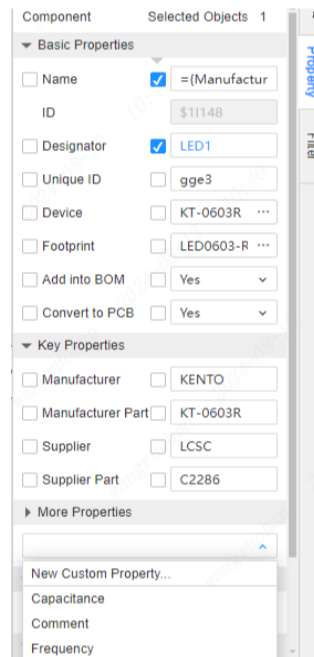
Εικόνα 32: Η καρτέλα Object.

Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 32 απεικονίζεται η καρτέλα Object, η οποία λειτουργεί ως ένας αναλυτικός κατάλογος όλων των οντοτήτων που περιλαμβάνονται στη σελίδα του σχηματικού "1. P1". Η δομή οργανώνεται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- **Component:** Λίστα των τοποθετημένων εξαρτημάτων (π.χ. LED, αντιστάσεις, USB connector).
- **Wire/Bus:** Καταγραφή των αγωγών σύνδεσης και των διαύλων μεταφοράς δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των γραμμών τροφοδοσίας (+5V, GND).
- **Netflag:** Καταγραφή των ετικετών δικτύου και των θυρών τροφοδοσίας που καθορίζουν τους ηλεκτρικούς κόμβους του κυκλώματος.

Η καρτέλα αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή να έχει πλήρη εποπτεία της ηλεκτρικής συνδεσιμότητας και να εντοπίζει άμεσα οποιοδήποτε αντικείμενο, διευκολύνοντας τον έλεγχο και τη διόρθωση σφαλμάτων (debugging) σε επίπεδο δικτύων και εξαρτημάτων.

Η καρτέλα Object αποτελεί το καθολικό ευρετήριο των στοιχείων του σχεδίου, προσφέροντας μια αναλυτική προβολή όλων των οντοτήτων που υπάρχουν στην επιφάνεια εργασίας. Σε αυτήν περιλαμβάνονται ταξινομημένες οι συσκευές (devices), οι αγωγοί (wires/buses), τα ειδικά σύμβολα (όπως θύρες εισόδου/εξόδου και σύμβολα τροφοδοσίας), καθώς και τα γραφικά στοιχεία (γραμμές, κείμενα, σχήματα). Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή να εντοπίζει, να επιλέγει και να τροποποιεί μαζικά αντικείμενα, διασφαλίζοντας τον απόλυτο έλεγχο ακόμα και στις πιο μικρές λεπτομέρειες της σχηματικής αναπαράστασης.



Εικόνα 33: Προσθήκη προσαρμοσμένων ιδιοτήτων στην καρτέλα Property.

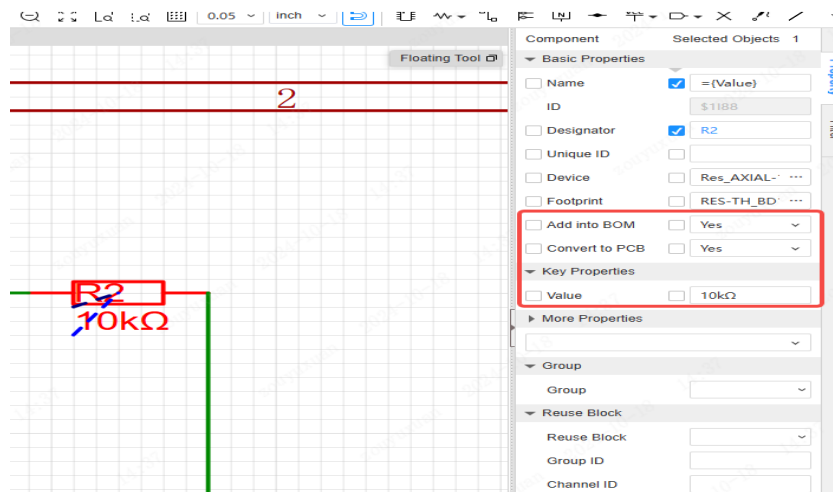
Στα δεξιά του περιβάλλοντος σχηματικής σχεδίασης βρίσκεται η καρτέλα Property (Εικόνα 33). Στην καρτέλα Property όπως φαίνεται στο παραπάνω στιγμιότυπο απεικονίζονται οι ιδιότητες ενός επιλεγμένου εξαρτήματος (LED1). Το πλαίσιο χωρίζεται σε τρεις κύριες ενότητες που διασφαλίζουν την πλήρη τεκμηρίωση του υλικού:

- **Basic Properties:** Περιλαμβάνει θεμελιώδη στοιχεία όπως ο προσδιοριστής (Designator), το ίχνος (Footprint) και την επιλογή συμπερίληψης στη λίστα υλικών (Add into BOM).
- **Key Properties:** Παρέχει δεδομένα εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως ο κατασκευαστής (Manufacturer: KENTO) και ο μοναδικός κωδικός προμηθευτή (Supplier Part), συνδέοντας άμεσα το σχέδιο με την αγορά.
- **Custom Properties:** Στο κάτω μέρος απεικονίζεται το μενού προσθήκης προσαρμοσμένων ιδιοτήτων (New Custom Property), επιτρέποντας στον σχεδιαστή να εισάγει εξειδικευμένες παραμέτρους όπως χωρητικότητα (Capacitance) ή συχνότητα (Frequency).

Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την ακριβή διαμόρφωση των εξαρτήματος, εξασφαλίζοντας ότι η εξαγωγή του BOM θα περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την παραγγελία και τη συναρμολόγηση της πλακέτας. Η δυνατότητα παρέμβασης σε παραμέτρους όπως το Footprint και η επιλογή Convert to PCB είναι ουσιώδης για την προετοιμασία της πλακέτας προς κατασκευή στη φρέζα CNC, αφού διασφαλίζουν ότι μόνο τα απαραίτητα στοιχεία θα συμπεριληφθούν στη διαδικασία της μηχανικής χάραξης.

Η καρτέλα Property επιτρέπει την παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών των επιλεγμένων αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Στην ενότητα των ιδιοτήτων εξαρτήματος (Component Properties), ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει το όνομα (Designator), τον κωδικό του εξαρτήματος (Part Number) και να ρυθμίσει την ορατότητα των στοιχείων αυτών στο σχέδιο. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα παρέμβασης στις πληροφορίες της συσκευής (Device), όπως ο ορισμός του κατασκευαστή ή η σύνδεση με συγκεκριμένα τεχνικά φυλλάδια (datasheets), διασφαλίζοντας ότι η πληροφορία που συνοδεύει το κύκλωμα είναι πλήρης και ακριβής.

Η δυνατότητα παρέμβασης σε παραμέτρους όπως το Footprint και η επιλογή Convert to PCB είναι ουσιώδης για την προετοιμασία της πλακέτας προς κατασκευή στη φρέζα CNC, διασφαλίζοντας ότι μόνο τα απαραίτητα στοιχεία θα συμπεριληφθούν στη διαδικασία της μηχανικής χάραξης.

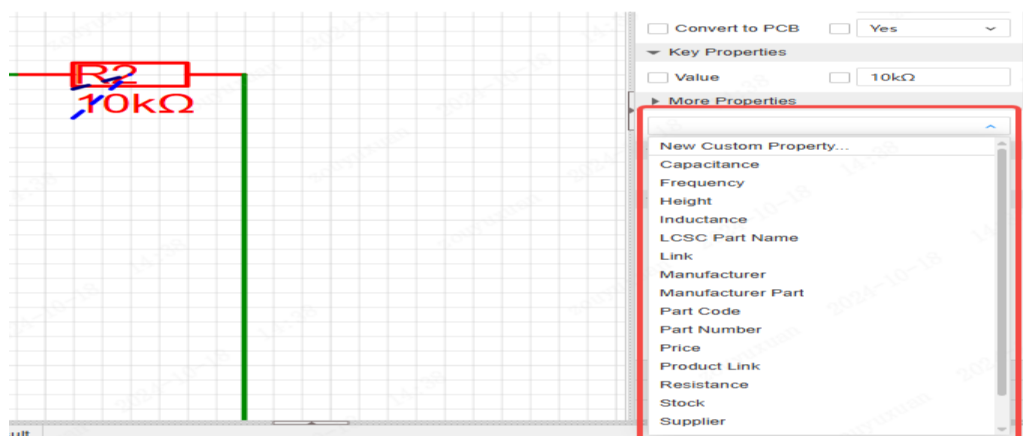


Εικόνα 34: Διαχείριση ιδιοτήτων εξαρτήματος και παράμετροι ενσωμάτωσης στη λίστα υλικών (BOM) και στο σχεδιασμό PCB.

Στο στιγμιότυπο του Property Panel (Εικόνα 34), απεικονίζεται η παραμετροποίηση μιας αντίστασης R2. Ιδιαίτερη σημασία για τη διαδικασία της σχεδίασης έχουν οι επιλογές που επισημαίνονται στο κόκκινο πλαίσιο:

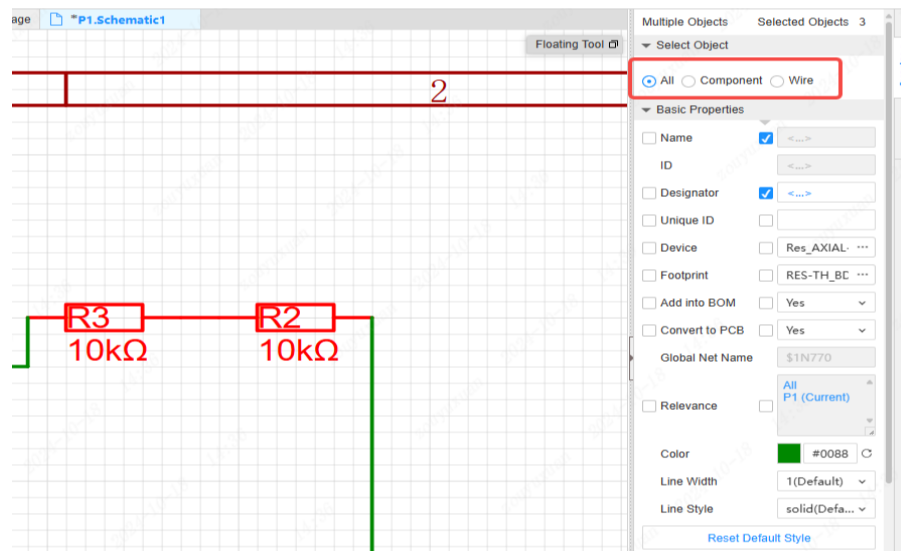
- Add into BOM: Καθορίζει εάν το εξάρτημα θα συμπεριληφθεί στην τελική λίστα υλικών για παραγγελία.
- Convert to PCB: Ορίζει εάν το εξάρτημα θα μεταφερθεί στην πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB layout).
- Key Properties (Value): Επιτρέπει την ορισμό της ηλεκτρικής τιμής του εξαρτήματος (10kΩ).

Η δυνατότητα ελέγχου αυτών των παραμέτρων προσφέρει ευελιξία, επιτρέποντας στον σχεδιαστή να περιλαμβάνει στο σχηματικό στοιχεία που έχουν μόνο επεξηγηματικό χαρακτήρα χωρίς να επηρεάζεται η τελική παραγωγή της πλακέτας ή η παραγγελία των υλικών.



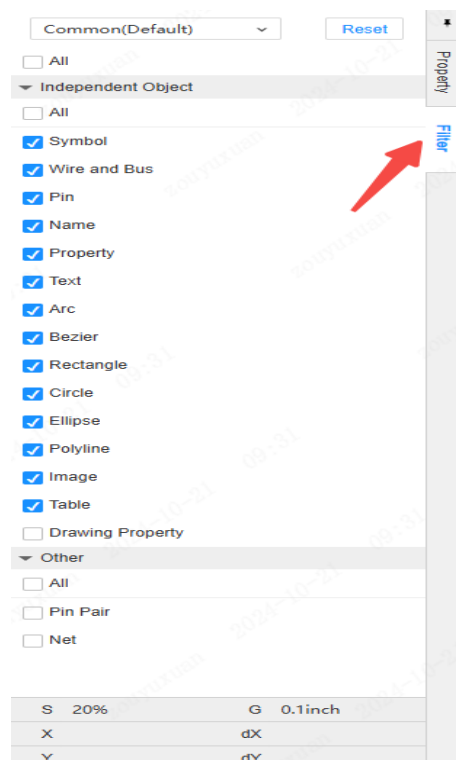
Εικόνα 35: Αναπτυσσόμενο μενού των πρόσθετων ιδιοτήτων στο Property Panel.

Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 35 ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να επιλέξει από μια λίστα προκαθορισμένων παραμέτρων, όπως Manufacturer, Part Number, Price και Stock, ή να δημιουργήσει εντελώς νέες ιδιότητες μέσω της επιλογής New Custom Property. Η λειτουργία αυτή είναι σημαντική για την πλήρη τεκμηρίωση του έργου, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση τεχνικών πληροφοριών (π.χ. Resistance, Inductance) και εμπορικών δεδομένων απευθείας στο εξάρτημα. Η συγκέντρωση αυτών των πληροφοριών διασφαλίζει ότι η εξαγωγή του Bill of Materials (BOM) θα είναι πλήρης και έτοιμη για τη διαδικασία προμήθειας και συναρμολόγησης.



Εικόνα 36: Λειτουργία ομαδικής επιλογής και φιλτραρίσματος αντικειμένων (Select Object Filter) στο EasyEDA Pro.

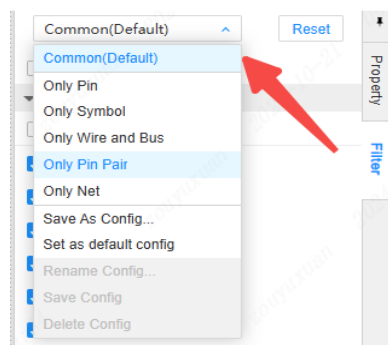
Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 36, όταν επιλέγονται περισσότερα από ένα στοιχεία (στην προκειμένη περίπτωση, τρία αντικείμενα), το Property Panel παρέχει ένα εργαλείο φιλτραρίσματος (Select Object), επιτρέποντας στον σχεδιαστή να απομονώσει συγκεκριμένες κατηγορίες, όπως Component (Εξαρτήματα) ή Wire (Αγωγοί). Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τη μαζική τροποποίηση κοινών ιδιοτήτων, όπως η αλλαγή χρώματος, το πάχος των γραμμών (Line Width) ή το στυλ σχεδίασης (Line Style), διασφαλίζοντας την ομοιομορφία και την ταχύτητα κατά την επεξεργασία σύνθετων σχηματικών διαγραμμάτων. Ο μετρητής επιλεγμένων αντικειμένων παρέχει άμεση οπτική επιβεβαίωση στον χρήστη, αποτρέποντας την κατά λάθος τροποποίηση στοιχείων που μπορεί να βρίσκονται εκτός του άμεσου οπτικού πεδίου της οθόνης.



Εικόνα 37: Η καρτέλα Filter.

Στα δεξιά της σχηματικής σχεδίασης βρίσκεται και η καρτέλα Filter (Εικόνα 37), η οποία επιτρέπει στον σχεδιαστή να καθορίζει ποιοι τύποι αντικειμένων θα είναι "ενεργοί" για επιλογή. Μέσω της λίστας Independent Object, ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει το φιλτράρισμα για στοιχεία όπως Symbols (Σύμβολα), Wires (Αγωγοί), Texts (Κείμενα) και γεωμετρικά σχήματα (Arc, Circle, Polyline). Η λειτουργία αυτή είναι υποστηρικτική σε πυκνά σχηματικά διαγράμματα, καθώς επιτρέπει, για παράδειγμα, τη μαζική επιλογή μόνο των κειμένων ή μόνο των αγωγών, αποτρέποντας την κατά λάθος μετακίνηση εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.

Από την καρτέλα Filter, το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα παραμετροποίησης της επιλεκτικότητας των αντικειμένων ανά κατηγορία. Η δυνατότητα απενεργοποίησης ορισμένων κλάσεων, όπως τα γραφικά στοιχεία (Circle, Polyline) ή οι ιδιότητες (Property), προστατεύει τον σχεδιαστή από τυχαίες τροποποιήσεις κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας σύνθετων περιοχών. Επιπλέον, οι λειτουργίες Pin Pair και Net που βρίσκονται στην ενότητα "Other", επιτρέπουν την ταχεία απομόνωση ηλεκτρικών διαδρομών, διασφαλίζοντας ότι η συνδεσιμότητα του κυκλώματος είναι πλήρης πριν το στάδιο της κατασκευής με τη φρέζα Wegstr CNC.

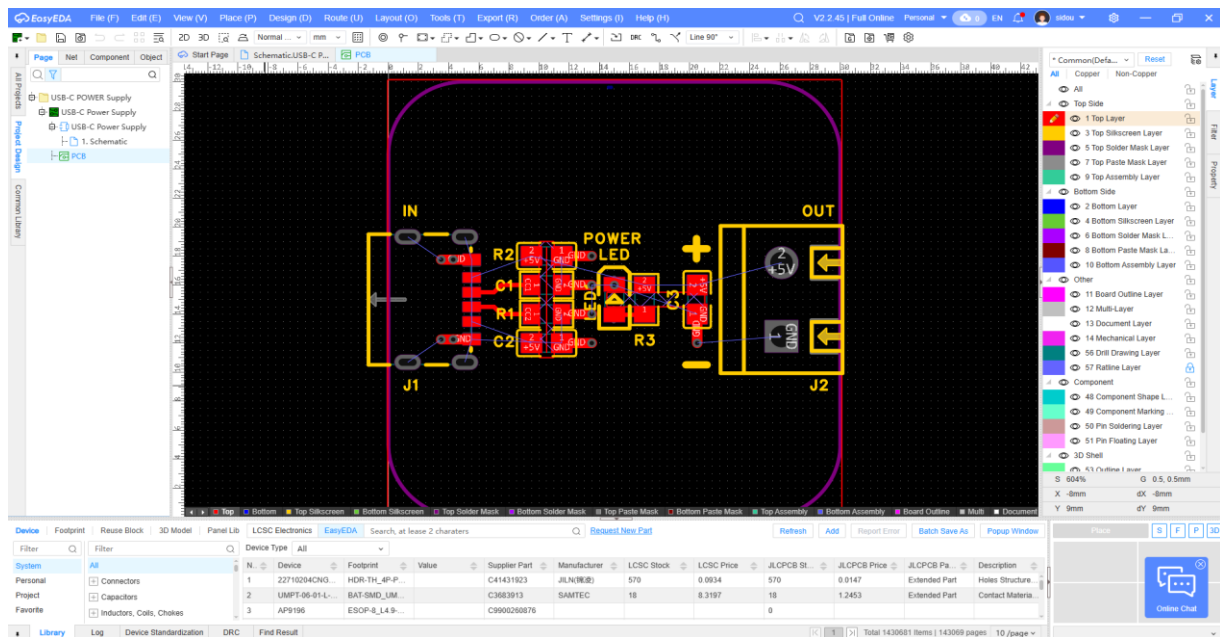


Εικόνα 38: Μενού προδιαμορφωμένων ρυθμίσεων (Filter Config) και δυνατότητες παραμετροποίησης του φίλτρου επιλογής στο EasyEDA Pro.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω αναδυόμενο μενού της Εικόνας 38, το λογισμικό παρέχει έτοιμα προφίλ επιλογής, όπως το "Only Wire and Bus" ή το "Only Symbol", τα οποία περιορίζουν την ικανότητα του ποντικιού να αλληλεπιδρά μόνο με συγκεκριμένες κατηγορίες αντικειμένων. Παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα στον σχεδιαστή να αποθηκεύσει τις δικές του εξατομικευμένες ρυθμίσεις (Save As Config), να ορίζει μια προεπιλογή (Set as default) ή να επαναφέρει τις αρχικές ρυθμίσεις μέσω του πλήκτρου Reset. Η λειτουργία αυτή είναι καθοριστική για τη βελτιστοποίηση της ροής εργασίας, ειδικά κατά τη φάση της διορθωτικής επεξεργασίας σε πυκνά και πολυεπίπεδα σχέδια.

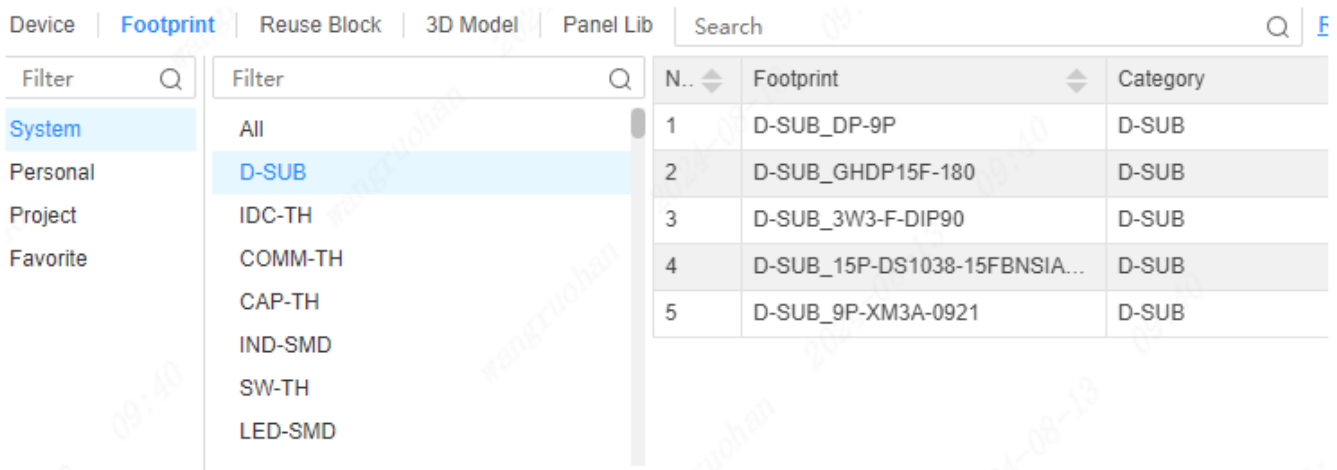
4.4.2.Σύντομη Περιγραφή του Σχεδιασμού Τυπωμένου Κυκλώματος - PCB Design

Με το ίδιο λογισμικό το σχηματικό μπορεί να μετατραπεί σε τυπωμένο κύκλωμα PCB, ακολουθώντας τη διαδρομή από το μενού Design -> Update/Convert Schematic to PCB. Σε περίπτωση ύπαρξης εξαρτημάτων χωρίς footprint ή σφαλμάτων στις συνδέσεις, το πρόγραμμα εμφανίζει ειδοποιήσεις για τις απαραίτητες διορθώσεις. Στο νέο αρχείο PCB εμφανίζονται τα εξαρτήματα και οι γραμμές σύνδεσης. Ο ορισμός του σχήματος της πλακέτας (Board Outlining) γίνεται από το μενού Place -> Board Outline, επιλέγοντας το επιθυμητό σχήμα, το πρόγραμμα θα το τοποθετήσει αυτόματα στο σωστό επίπεδο (Layer). Η δομή και η διάταξη των επιμέρους στοιχείων του PCB παρουσιάζονται μέσω γραφικών αναπαραστάσεων από το σχεδιαστικό λογισμικό.



Εικόνα 39: Το γραφικό περιβάλλον του τυπωμένου κυκλώματος PCB στο EasyEDA Pro.

Η διαχείριση των αποτυπωμάτων (footprints) γίνεται μέσω του πάνελ Library που βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης. Περιλαμβάνει τα προεπιλεγμένα και πιο κοινά εξαρτήματα, έχει άμεση πρόσβαση σε εξαρτήματα από την αγορά, που συνοδεύονται από έτοιμα footprints και 3D μοντέλα. Περιέχει footprints που έχουν δημιουργηθεί και μοιραστεί από την κοινότητα των χρηστών και τα προσωπικά αποθηκευμένα footprints. Αν τροποποιηθεί ένα footprint στη βιβλιοθήκη ενώ χρησιμοποιείται ήδη σε ένα project, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή Update Project Library για να εφαρμοστούν οι αλλαγές στο τρέχον PCB. Εάν απαιτείται να γίνει αλλαγή ή έλεγχος στα footprints από το μενού Tools -> Footprint Manager εντοπίζεται ποιο footprint είναι αντιστοιχισμένο σε κάθε εξάρτημα για να γίνει η αλλαγή πριν προχωρήσει η σχεδίαση του PCB.

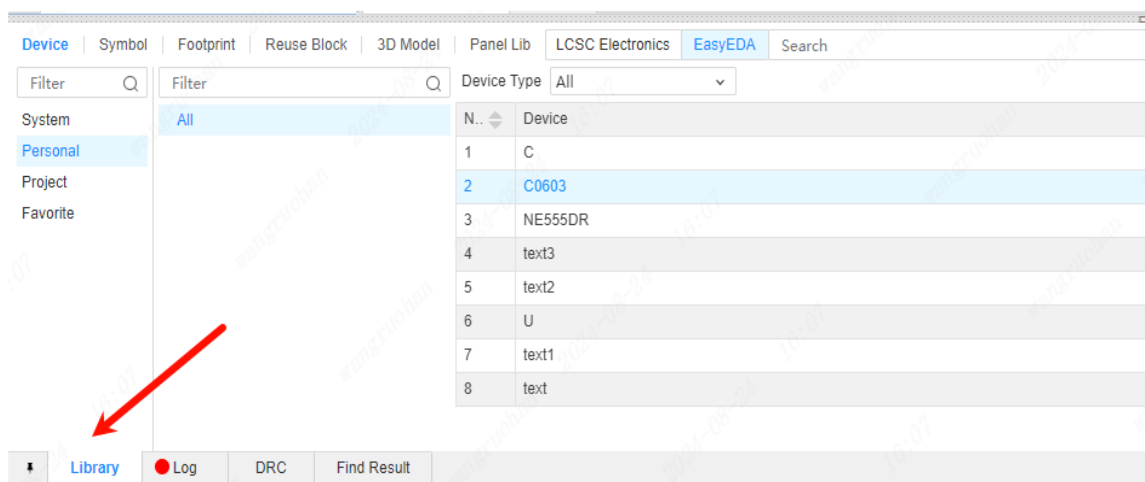


Εικόνα 40: Διεπαφή διαχείρισης αποτυπωμάτων (Footprint Library) και κατηγοριοποίηση εξαρτημάτων στο περιβάλλον EasyEDA Pro.

Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 40 απεικονίζεται η βιβλιοθήκη αποτυπωμάτων (Footprints), η οποία περιλαμβάνει τη γεωμετρική πληροφορία των εξαρτημάτων για την πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Η διεπαφή οργανώνεται σε τρία επίπεδα φιλτραρίσματος:

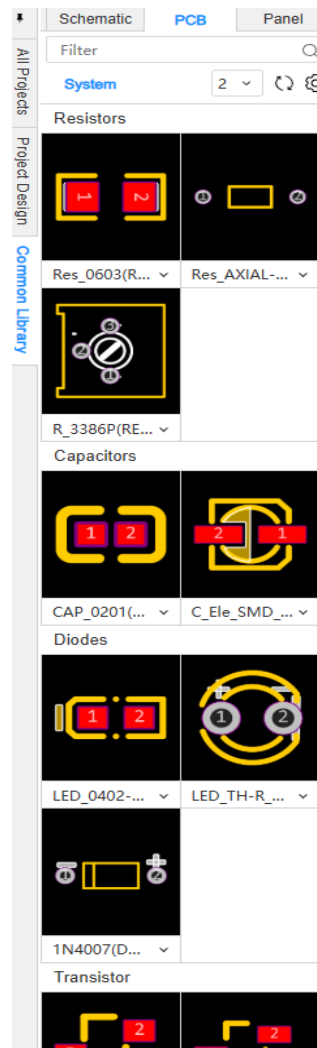
- Πηγή Βιβλιοθήκης (Αριστερά): Επιλογή μεταξύ συστηματικών (System), προσωπικών (Personal) ή αρχείων που ανήκουν στο συγκεκριμένο έργο (Project).
- Κατηγοριοποίηση (Κέντρο): Ταξινόμηση των αποτυπωμάτων βάσει τύπου, όπως D-SUB (σύνδεσμοι), IDC-TH (διαμπερή εξαρτήματα), CAP-TH (πυκνωτές) και LED-SMD (εξαρτήματα επιφανειακής στήριξης).
- Λίστα Αποτυπωμάτων (Δεξιά): Αναλυτική παράθεση των διαθέσιμων ιχνών με τη συγκεκριμένη ονοματολογία τους (π.χ. D-SUB_DP-9P).

Η δομή αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή να εντοπίζει με ακρίβεια το φυσικό αποτύπωμα που αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό σύμβολο, διασφαλίζοντας τη σωστή χωροθέτηση και τις ορθές αποστάσεις των οπών ή των pads κατά την κατασκευή της πλακέτας.



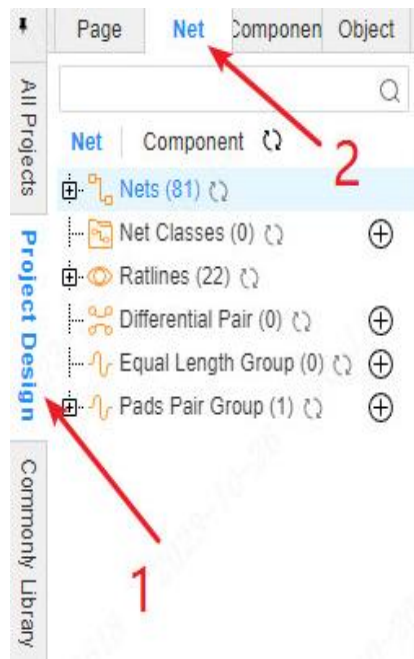
Εικόνα 41: Η διεπαφή της βιβλιοθήκης (Library) στο EasyEDA Pro για τη διαχείριση των σχεδιαστικών πόρων.

Στο παραπάνω στιγμιότυπο της Εικόνας 41 απεικονίζεται το κάτω αριστερό τμήμα της διεπαφής χρήστη, όπου η καρτέλα Library (υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος) παρέχει πρόσβαση σε όλα τα δομικά στοιχεία της σχεδίασης. Μέσα από αυτό το πάνελ, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους πόρων, όπως Device (ολοκληρωμένες συσκευές), Symbol (σχηματικά σύμβολα), Footprint (αποτυπώματα PCB) και 3D Model. Στην προκειμένη περίπτωση, είναι επιλεγμένη η προσωπική βιβλιοθήκη (Personal), εμφανίζοντας μια λίστα αποθηκευμένων εξαρτημάτων (π.χ. NE555DR, C0603). Η οργάνωση αυτή εξασφαλίζει την ταχεία μετάβαση από τη βιβλιοθήκη στο περιβάλλον εργασίας, διευκολύνοντας την τοποθέτηση εξαρτημάτων απευθείας στην πλακέτα ή στο σχηματικό διάγραμμα.



Εικόνα 42: Διεπαφή της βιβλιοθήκης συνηθισμένων αποτυπωμάτων (Common Footprint Library) στο περιβάλλον σχεδίασης PCB του EasyEDA Pro.

Η καρτέλα Common Library προσαρμοσμένη στις ανάγκες του PCB Editor (Εικόνα 42) σε αντίθεση με το Schematic, όπου παρουσιάζονται τα φυσικά ίχνη των εξαρτημάτων, οργανωμένα σε κατηγορίες όπως Resistors (Αντιστάσεις), Capacitors (Πυκνωτές) και Diodes (Δίοδοι/LED). Για κάθε κατηγορία, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών τοποθέτησης, όπως SMD (π.χ. Res_0603) ή Through-Hole (π.χ. Res_AXIAL), διασφαλίζοντας την ορθή γεωμετρική απεικόνιση των σημείων συγκόλλησης (pads) και των περιγραμμάτων μεταξοτυπίας (silkscreen) επάνω στην πλακέτα.

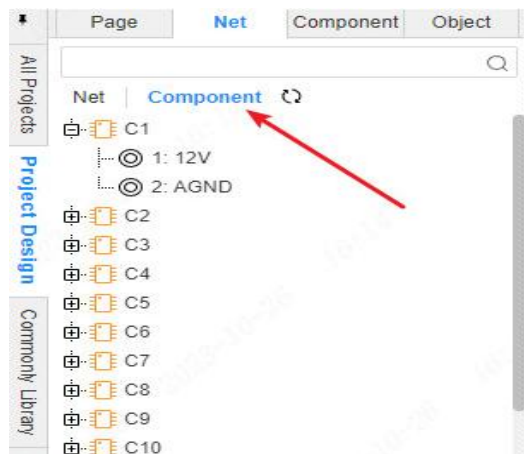


Εικόνα 43: Ο πίνακας Project Design και η καρτέλα Net στο EasyEDA Pro, όπου διακρίνονται τα εργαλεία ιεράρχησης και ομαδοποίησης των ηλεκτρικών δικτύων.

Στην Εικόνα 43 απεικονίζεται η οργάνωση των ηλεκτρικών δικτύων του έργου μέσω της καρτέλας Net (2) εντός της ενότητας Project Design (1). Η διεπαφή επιτρέπει την εποπτεία και τον έλεγχο κρίσιμων παραμέτρων της πλακέτας:

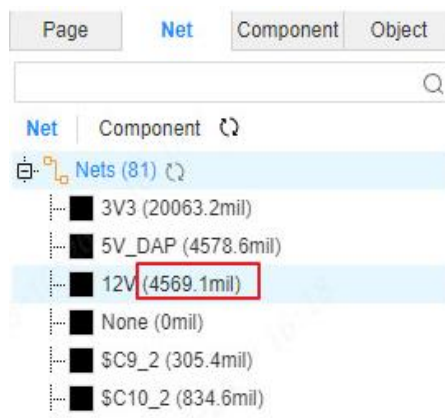
- Nets (81): Καταγραφή όλων των ηλεκτρικών κόμβων του κυκλώματος.
- Ratlines (22): Ένδειξη των συνδέσεων που έχουν οριστεί στο σχηματικό αλλά δεν έχουν ακόμη δρομολογηθεί με χαλκοδιάδρομο στο PCB.
- Net Classes: Δυνατότητα ομαδοποίησης δικτύων (π.χ. γραμμές τροφοδοσίας έναντι σημάτων) για την εφαρμογή ειδικών κανόνων σχεδίασης (Design Rules).
- Differential Pairs & Equal Length Groups: Εργαλεία για τη διαχείριση σημάτων υψηλής ταχύτητας που απαιτούν συγκεκριμένη γεωμετρία και εξίσωση μήκους αγωγών.

Η δομή αυτή παρέχει στον σχεδιαστή τα απαραίτητα εργαλεία για τη διασφάλιση της ηλεκτρικής ακεραιότητας και την αποτελεσματική διαχείριση της πολυπλοκότητας του τυπωμένου κυκλώματος.



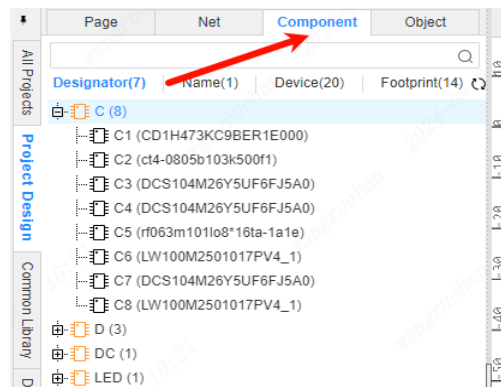
Εικόνα 44: Προβολή των ηλεκτρικών δικτύων (Nets) ανά εξάρτημα (Component) στο EasyEDA Pro. Διακρίνεται η αντιστοίχιση των ακίδων του πυκνωτή C1 στα δίκτυα τροφοδοσίας και γείωσης.

Η λειτουργία οργάνωσης της καρτέλας Net στην Εικόνα 44 με βάση τα εξαρτήματα (Component), όπως υποδεικνύεται από το κόκκινο βέλος. Η προβολή αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή να αναπτύξει το δέντρο κάθε φυσικού εξαρτήματος που είναι τοποθετημένο στην πλακέτα (π.χ. του πυκνωτή C1) και να επαληθεύσει σε ποιο ηλεκτρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένο κάθε pin του αποτυπώματος (π.χ. το Pin 1 στο δίκτυο 12V και το Pin 2 στο AGND). Η συγκεκριμένη δυνατότητα είναι θεμελιώδης για τον έλεγχο της ορθότητας των συνδέσεων κατά τη φάση της δρομολόγησης (routing), καθώς επιτρέπει την άμεση διασταύρωση των ηλεκτρικών επαφών με τις φυσικές θέσεις των ακροδεκτών επάνω στην πλακέτα.



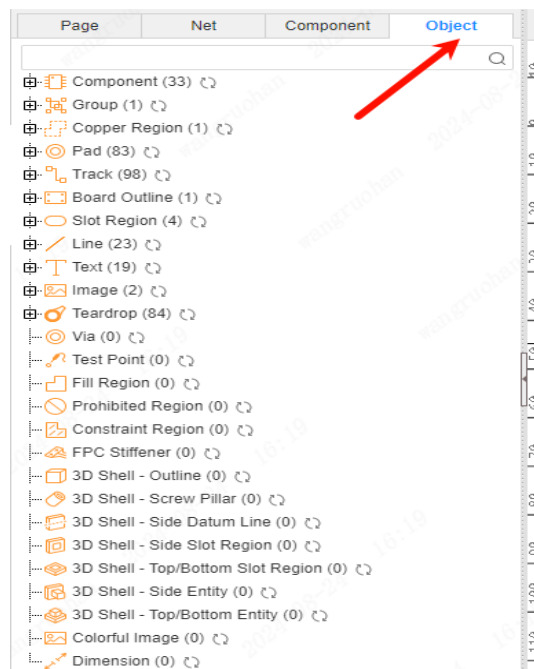
Εικόνα 45: Προβολή της λίστας δικτύων (Nets) στο EasyEDA Pro. Επισημαίνεται το συνολικό μήκος του δικτύου 12V (4569.1 mil), στοιχείο απαραίτητο για τον υπολογισμό της αντίστασης των αγωγών.

Η λίστα των ηλεκτρικών δικτύων στην καρτέλα Net του PCB Editor απεικονίζεται στην Εικόνα 45. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τιμή εντός της παρένθεσης (π.χ. 4569.1mil για το δίκτυο των 12V), η οποία αντιπροσωπεύει το συνολικό μήκος (Total Length) των διαδρομών χαλκού που έχουν δρομολογηθεί για το συγκεκριμένο δίκτυο. Η πληροφορία αυτή, εκφρασμένη σε χιλιοστά της ίντσας (mils), είναι καθοριστική για τον έλεγχο της πτώσης τάσης σε γραμμές ισχύος, καθώς και για τον συγχρονισμό σημάτων σε δίκτυα υψηλής συχνότητας, όπου η διατήρηση συγκεκριμένου μήκους αγωγών είναι απαραίτητη για την αποφυγή φαινομένων καθυστέρησης (propagation delay). Ωστόσο, επισημαίνεται ότι για τον ακριβή υπολογισμό της πτώσης τάσης, η πληροφορία του μήκους πρέπει να συνδυάζεται με το πλάτος και το πάχος του χαλκού, καθώς οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν τη συνολική ωμική αντίσταση του αγωγού.



Εικόνα 46: Η διεπαφή διαχείρισης εξαρτημάτων (Component Tab) στο EasyEDA Pro. Παρουσιάζεται η ιεραρχική οργάνωση των πυκνωτών (C1-C8) και η σύνδεσή τους με συγκεκριμένα είδη βιβλιοθήκης.

Η οργάνωση των εξαρτημάτων στην καρτέλα Component παρουσιάζεται στην Εικόνα 46. Το λογισμικό ομαδοποιεί τα υλικά βάσει του προσδιοριστή τους (Designator), όπως φαίνεται στην κατηγορία C (8) για τους πυκνωτές. Ιδιαίτερη σημασία έχει η αναγραφή των κωδικών παραγγελίας ή των μοντέλων δίπλα σε κάθε εξάρτημα (π.χ. CD1H473KC... για τον C1), πληροφορία που αντλείται απευθείας από τη βάση δεδομένων της LCSC. Η δομή αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή να επιβλέπει τη λίστα των υλικών (BOM) σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι κάθε φυσικό αποτύπωμα στην πλακέτα αντιστοιχεί στο σωστό εξάρτημα προμήθειας.



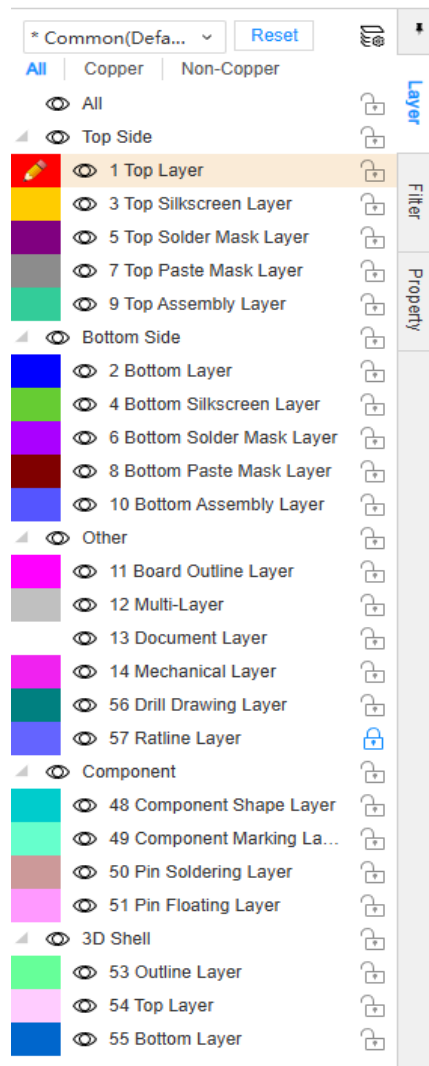
Εικόνα 47: Πλήρης κατάλογος αντικειμένων στην καρτέλα Object.

Η καρτέλα Object, η οποία λειτουργεί ως ένας πλήρης κατάλογος όλων των οντοτήτων που απαρτίζουν το τυπωμένο κύκλωμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 47. Σε αντίθεση με το Schematic, εδώ η ιεραρχία περιλαμβάνει καθαρά κατασκευαστικά στοιχεία, όπως:

- Track (98): Ο συνολικός αριθμός των μεμονωμένων τμημάτων χαλκοδιαδρόμων.
- Pad (83): Τα σημεία σύνδεσης και συγκόλλησης των εξαρτημάτων.
- Teardrop (84): Ενισχύσεις στις ενώσεις αγωγών με pads, κρίσιμες για τη μηχανική αντοχή της πλακέτας.
- Board Outline (1): Το φυσικό περίγραμμα κοπής της πλακέτας.

- Via (0): Ο αριθμός των επιμεταλλωμένων οπών για τη σύνδεση διαφορετικών επιπέδων (layers).
- 3D Shell: Η λίστα περιλαμβάνει και στοιχεία 3D Shell, υποδηλώνοντας την ικανότητα του λογισμικού να ενσωματώνει μηχανολογικά δεδομένα (π.χ. βίδες, περιβλήματα) απευθείας στο PCB project.

Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή να ελέγχει την πολυπλοκότητα της πλακέτας και να εντοπίζει άμεσα στοιχεία όπως Vias ή Test Points, διευκολύνοντας τον έλεγχο κατασκευασιμότητας (Design for Manufacturability- DFM) και τη διαχείριση των μηχανικών λεπτομερειών του έργου.



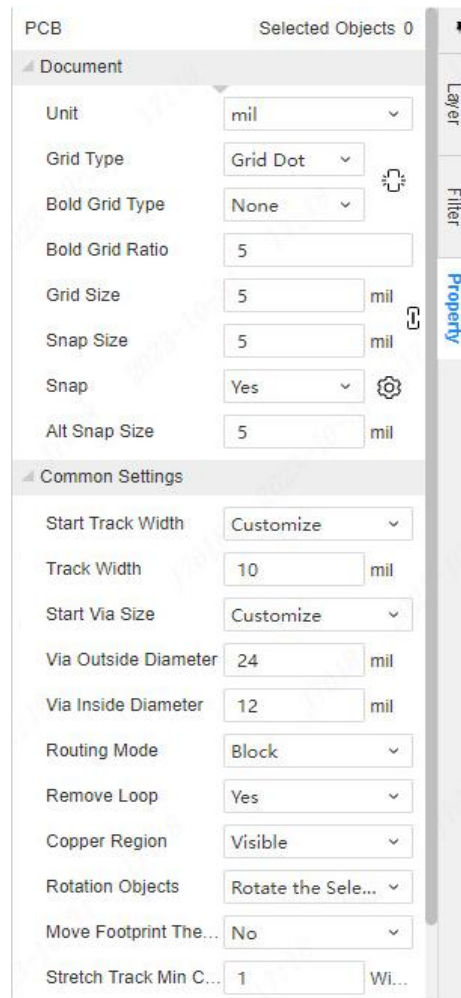
Εικόνα 48: Διαχείριση επιπέδων (Layer Manager) και οργάνωση στοίβας υλικών στο PCB.

Το πάνελ διαχείρισης επιπέδων (Layer), το οποίο καθορίζει τη φυσική και λειτουργική δομή της πλακέτας, προβάλλεται στην Εικόνα 48. Τα επίπεδα ομαδοποιούνται σε πέντε κύριες κατηγορίες:

- Top & Bottom Side: Περιλαμβάνουν τα επίπεδα χαλκού (Top/Bottom Layer), τη μεταξοτυπία (Silkscreen), τη μάσκα συγκόλλησης (Solder Mask) και τα επίπεδα συναρμολόγησης.
- Other: Περιλαμβάνει κρίσιμα επίπεδα όπως το Board Outline (περίγραμμα κοπής), το Multi-Layer (για διαμπερείς οπές) και το Mechanical Layer για μηχανολογικές λεπτομέρειες.

- **Component & 3D Shell:** Επίπεδα που αφορούν το σχήμα των εξαρτημάτων και την τρισδιάστατη απεικόνιση των περιβλημάτων.

Ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την ορατότητα (εικονίδιο οφθαλμού) και το κλείδωμα (εικονίδιο λουκέτου) κάθε επιπέδου ξεχωριστά, διασφαλίζοντας την ακρίβεια κατά τη δρομολόγηση και την επεξεργασία των διαφορετικών υλικών της πλακέτας. Επισημαίνεται ότι το κόκκινο (Top Layer) και το μπλε (Bottom Layer) είναι τα στάνταρ χρώματα για τον χαλκό στην πάνω και κάτω πλευρά αντίστοιχα.

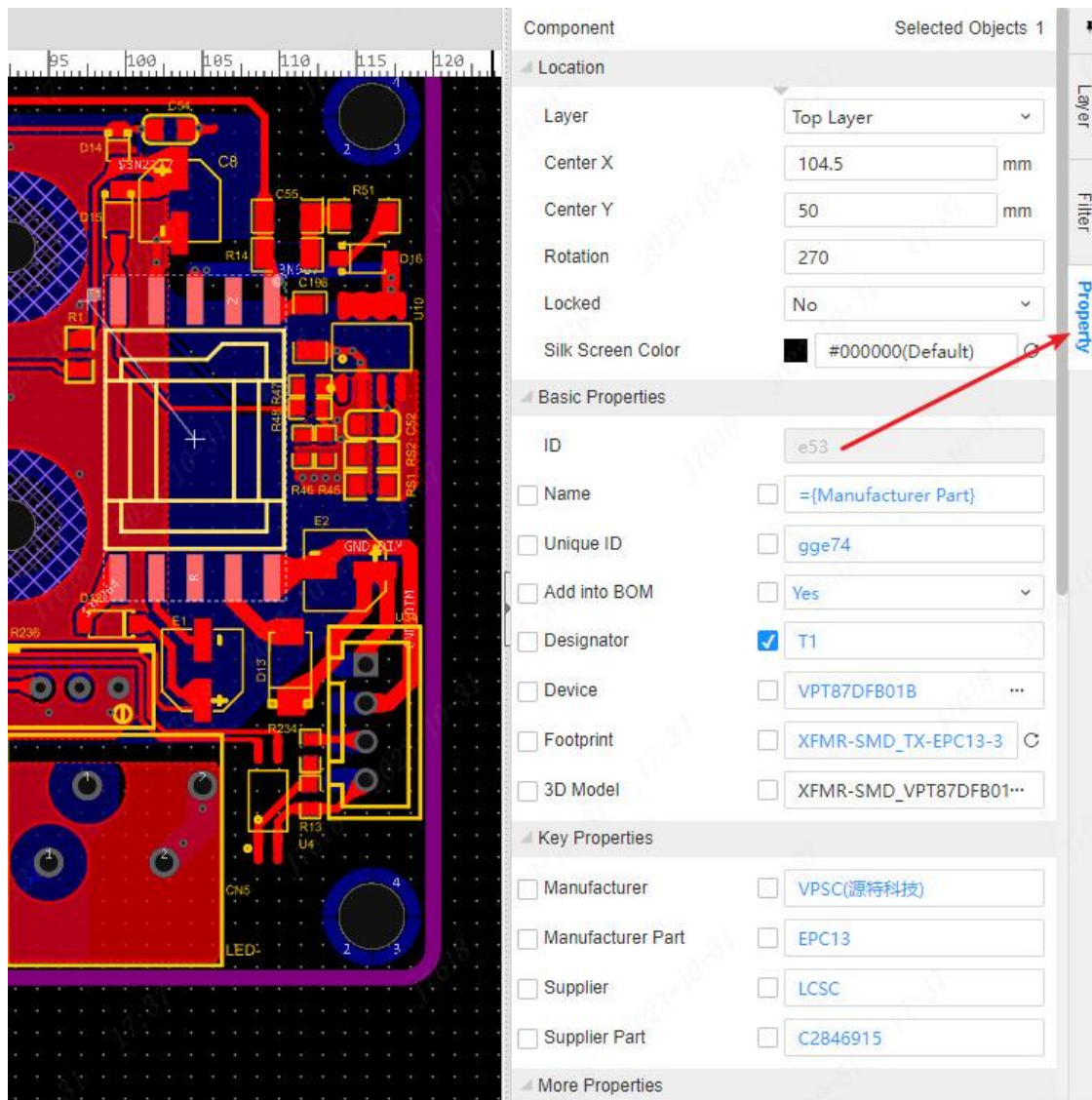


Εικόνα 49: Πάνελ γενικών ρυθμίσεων εγγράφου (Canvas Properties) και προεπιλεγμένων παραμέτρων δρομολόγησης στο PCB.

Στην Εικόνα 49 απεικονίζεται η παραμετροποίηση του περιβάλλοντος εργασίας της πλακέτας. Η διεπαφή χωρίζεται σε δύο βασικές ενότητες:

- **Document:** Καθορίζονται οι μονάδες μέτρησης (Unit: mil), ο τύπος και το μέγεθος του πλέγματος (Grid Size), καθώς και η δύναμη έλξης του κέρσορα (Snap Size), εξασφαλίζοντας την ακρίβεια στην τοποθέτηση των εξαρτημάτων.
- **Common Settings:** Ορίζονται οι προεπιλεγμένες τιμές για τη δρομολόγηση, όπως το αρχικό πλάτος των διαδρόμων χαλκού (Track Width: 10 mil) και οι διαστάσεις των οπών διασύνδεσης (Via Size).

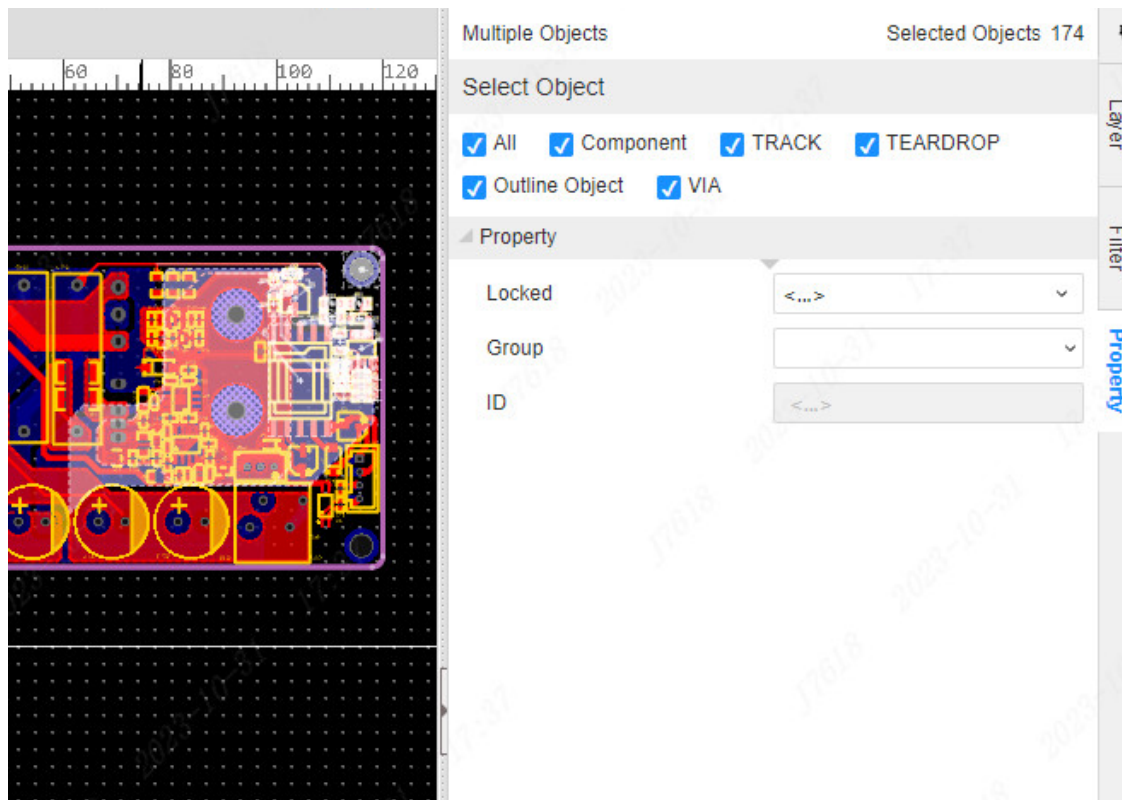
Παράλληλα, παρέχονται επιλογές για τη λειτουργία δρομολόγησης (Routing Mode) και τη διαχείριση των περιοχών χαλκού (Copper Region), επιτρέποντας στον σχεδιαστή να προσαρμόσει το λογισμικό στις συγκεκριμένες κατασκευαστικές προδιαγραφές της πλακέτας.



Εικόνα 50: Το πλαίσιο ιδιοτήτων (Property Panel) για την παραμετροποίηση επιλεγμένου εξαρτήματος στο περιβάλλον του PCB.

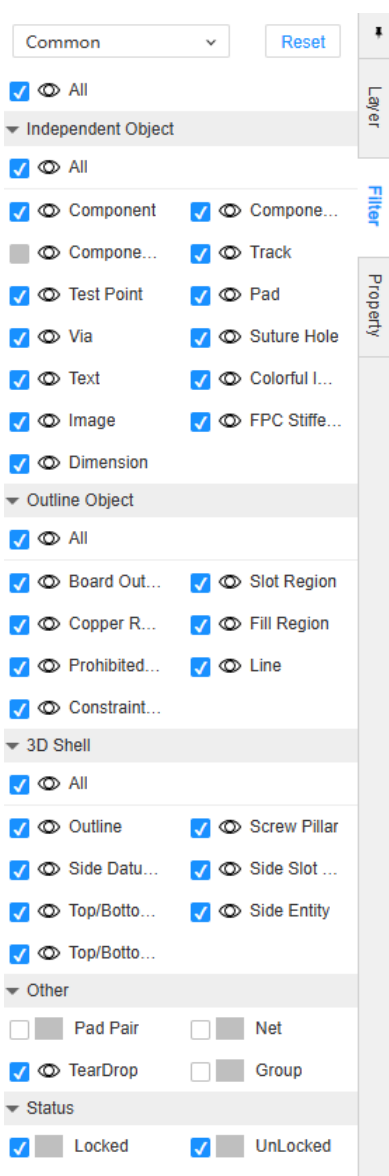
Το Property Panel κατά την επιλογή ενός μετασχηματιστή (T1) απεικονίζεται στην Εικόνα 50. Η διεπαφή επιτρέπει τον λεπτομερή έλεγχο του εξαρτήματος σε τρία επίπεδα:

- **Location:** Καθορίζεται η ακριβής θέση στις κατευθύνσεις X και Y (σε mm), το επίπεδο τοποθέτησης (Layer: Top Layer), η γωνία περιστροφής (Rotation) και η δυνατότητα κλειδώματος (Locked) για την αποφυγή τυχαίων μετακινήσεων.
- **Basic Properties:** Περιλαμβάνει την ταυτοποίηση του εξαρτήματος μέσω του ID και του Designator (T1), καθώς και τη σύνδεση με το φυσικό αποτύπωμα (Footprint) και το τρισδιάστατο μοντέλο (3D Model).
- **Key Properties:** Παρέχει άμεση πρόσβαση στα δεδομένα παραγωγής, όπως ο κατασκευαστής (Manufacturer) και ο κωδικός προμηθευτή της LCSC, διασφαλίζοντας την ιχνηλασιμότητα του εξαρτήματος από το σχέδιο έως την τελική λίστα υλικών (BOM).



Εικόνα 51: Μαζική επιλογή αντικειμένων και λειτουργία φιλτραρίσματος ιδιοτήτων (Multiple Objects Selection) στο περιβάλλον του PCB.

Στην Εικόνα 51 απεικονίζεται η ταυτόχρονη επιλογή 174 αντικειμένων επάνω στην πλακέτα, όπως αναγράφεται στον μετρητή Selected Objects. Το λογισμικό παρέχει ένα δυναμικό εργαλείο φιλτραρίσματος (Select Object), επιτρέποντας στον σχεδιαστή να απομονώσει συγκεκριμένους τύπους οντοτήτων, όπως Components (Εξαρτήματα), Tracks (Διαδρόμους), Vias (Οπές διασύνδεσης) και Teardrops. Η λειτουργία αυτή είναι καθοριστική για τη μαζική τροποποίηση κοινών χαρακτηριστικών (π.χ. ομαδικό κλείδωμα αντικειμένων μέσω της επιλογής Locked), διασφαλίζοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια κατά τη διαχείριση σύνθετων διατάξεων με υψηλή πυκνότητα εξαρτημάτων. Επισημαίνεται ότι όταν επιλέγονται πολλά αντικείμενα, το πεδίο Property δείχνει μόνο τις κοινές ιδιότητες. Αν οι τιμές διαφέρουν, εμφανίζεται η ένδειξη <...>, όπως φαίνεται στην Εικόνα 51. Να αναφερθεί ότι αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για να μετακινηθεί ένα ολόκληρο τμήμα του κυκλώματος (block) χωρίς να χαθεί η σχετική θέση των εξαρτημάτων και των διαδρόμων μεταξύ τους. Η επιλογή Outline Object που είναι τσεκαρισμένη αφορά το περίγραμμα της πλακέτας ή των εξαρτημάτων, εξασφαλίζοντας ότι και αυτά τα γεωμετρικά στοιχεία συμπεριλαμβάνονται στην ομάδα επεξεργασίας.



Εικόνα 52 Το πάνελ φιλτραρίσματος αντικειμένων (Selection Filter) και οι δυνατότητες ελέγχου ορατότητας και επιλογής στο περιβάλλον του PCB.

Στην Εικόνα 52 απεικονίζεται η καρτέλα Filter, η οποία επιτρέπει στον σχεδιαστή να διαχειρίζεται με ακρίβεια ποια στοιχεία της πλακέτας είναι ορατά (εικονίδιο οφθαλμού) και ποια μπορούν να επιλεγούν με το ποντίκι (checkbox). Η οργάνωση των φίλτρων γίνεται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- **Independent Object:** Περιλαμβάνει δομικά στοιχεία όπως Component (Εξαρτήματα), Track (Αγωγοί), Pad (Σημεία συγκόλλησης) και Via (Οπές διασύνδεσης).
- **Outline Object:** Αφορά γεωμετρικά στοιχεία και περιοχές, όπως το Board Outline (Περίγραμμα πλακέτας) και Copper Region (Περιοχές χαλκού).
- **3D Shell:** Διαχειρίζεται τα τρισδιάστατα στοιχεία του σχεδίου, όπως Screw Pillars (Στηρίγματα βιδών) και πλευρικές οντότητες (Side Entity), που αφορούν τον τρισδιάστατο σχεδιασμό και την αναπαράσταση των κατακόρυφων επιφανειών της πλακέτας ή των εξαρτημάτων.
- **Status:** Επιτρέπει τον διαχωρισμό μεταξύ κλειδωμένων (Locked) και μη κλειδωμένων (Unlocked) αντικειμένων.

4.4.3 Η Συνοπτική Ροή Σχεδίασης στο EasyEDA Pro

Σύμφωνα με την Εικόνα 53, το περιβάλλον EasyEDA Pro παρέχει συνοπτικά και κωδικοποιημένα τις εξής δυνατότητες:

Δημιουργία Νέου Project.

- Το EasyEDA Pro δημιουργεί αυτόματα ένα σχηματικό (Schematic) και ένα αρχείο PCB για το project.

Σχεδίαση σχηματικού διαγράμματος (Schematic).

- Αναζήτηση εξαρτημάτων μέσω των βιβλιοθηκών.
- Τοποθέτηση των εξαρτημάτων στον καμβά και σύνδεση αυτών.
- Έλεγχος κανόνων σχεδίασης DRC για αποφυγή σφαλμάτων και εύρεση ασύνδετων pins.

Μετατροπή σε PCB Layout.

- Από το μενού Design -> Convert to PCB.
- Επιβεβαίωση των αποτυπωμάτων των εξαρτημάτων.

Σχεδίαση της πλακέτας.

- Ορισμός περιγράμματος.
- Τοποθέτηση εξαρτημάτων μέσα στο περίγραμμα με την βέλτιστη διάταξη των διαδρομών.
- Αυτόματη ή χειροκίνητη δρομολόγηση για σύνδεση των εξαρτημάτων.

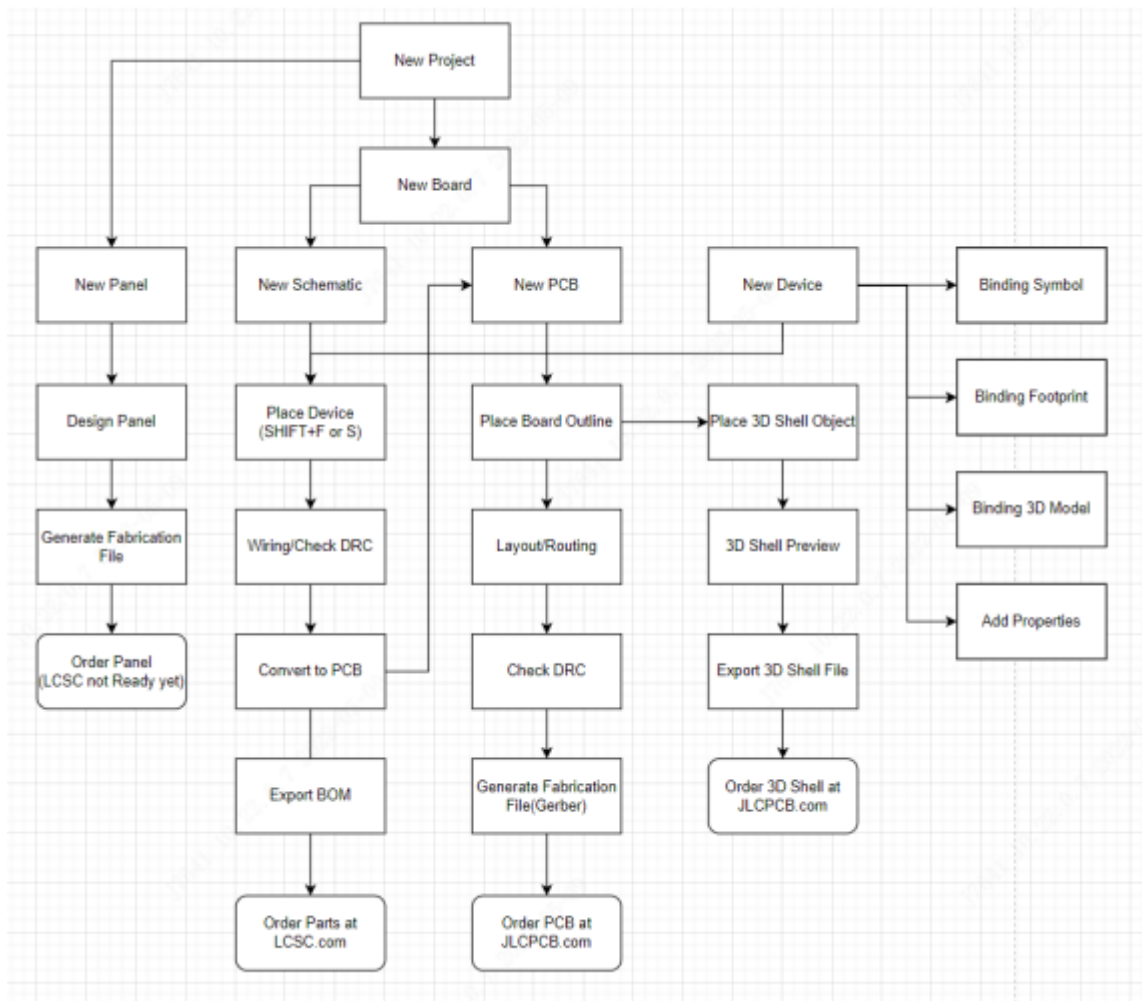
Τελικός έλεγχος και εξαγωγή.

- Έλεγχος κανόνων DRC στο PCB για εντοπισμό βραχυκυκλωμάτων ή λεπτών διαδρομών.
- Εξαγωγή Gerber από το μενού Export->Gerber για δημιουργία αρχείων που απαιτούνται για την κατασκευή από τη μηχανή CNC.
- Εξαγωγή λίστας υλικών BOM και τοποθέτηση των εξαρτημάτων.

Εν κατακλείδι, το EasyEDA Pro προσφέρει την απαραίτητη ακρίβεια και ευελιξία για την υλοποίηση κυκλωμάτων. Λειτουργίες όπως η διαχείριση ηλεκτρικών δικτύων (Net Management), ο έλεγχος κανόνων σχεδίασης (DRC) και η παραμετροποίηση των επιπέδων της πλακέτας (Layers), επιτρέπουν τη βέλτιστη δρομολόγηση και τη διασφάλιση της ηλεκτρικής ακεραιότητας ενός συστήματος. Η εμπειρία από τη χρήση του λογισμικού καταδεικνύει ότι τα εργαλεία cloud-based σχεδίασης αποτελούν πλέον το μέλλον στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων.

Η χρήση του EasyEDA Pro αποδείχθηκε καθοριστική για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Η ενιαία διεπαφή χρήστη μεταξύ σχηματικού και PCB, σε συνδυασμό με την άμεση πρόσβαση σε επαληθευμένες βιβλιοθήκες εξαρτημάτων, μειώνει σημαντικά τον χρόνο ανάπτυξης και την πιθανότητα σχεδιαστικών σφαλμάτων. Η πλατφόρμα προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση που καλύπτει όλο το φάσμα από τη θεωρητική σύλληψη έως την προετοιμασία των αρχείων κατασκευής, καθιστώντας την ένα ισχυρό εργαλείο για τον σύγχρονο σχεδιαστή ηλεκτρονικών συστημάτων.

Συμπερασματικά συνάγεται, ότι το λογισμικό EasyEDA Pro δεν υστερεί σε επιδόσεις έναντι των εμπορικών προγραμμάτων λογισμικών CAD. Δεν αποτελεί απλώς ένα εργαλείο σχεδίασης, αλλά μια εξελιγμένη απάντηση στις προκλήσεις του σύγχρονου ηλεκτρονικού σχεδιασμού. Παρά τις αυξημένες απαιτήσεις εκμάθησης, η δωρεάν πρόσβαση, η αλάνθαστη και αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ σχηματικού και πλακέτας, η ευκολία διαχείρισης σύνθετων έργων, η δυνατότητα εργασίας από οπουδήποτε και η άμεση σύνδεση με την παραγωγή αποτελούν εγγύηση ότι είναι ένα δραστικό εργαλείο επαγγελματικού σχεδιασμού πλακετών PCB.



Εικόνα 53: Ροή σχεδίασης στο EasyEDA Pro.

4.5. Το λογισμικό FlatCAM

4.5.1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη ηλεκτρονική σχεδίαση, ο σύνδεσμος μεταξύ του ψηφιακού σχεδίου (CAD) και της φυσικής κατασκευής (CAM) είναι καίριος για την πρωτοτυποποίηση PCB (PCB Prototyping) μέσω μηχανών CNC. Ένα από τα πιο διαδεδομένα δωρεάν προγράμματα ανοικτού κώδικα (open-source), γραμμένο σε Python, που εμβαθύνει στην προετοιμασία αρχείων για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) μέσω εργαλειομηχανών CNC είναι το εξειδικευμένο λογισμικό FlatCam.

Τα υποστηριζόμενα αρχεία προέλευσης από ένα πρόγραμμα σχεδίασης CAD όπως το EasyEDA Pro είναι:

- Gerber: Σύνολο αρχείων που περιγράφουν κάθε στρώμα (layer) της πλακέτας, όπως τον χαλκό, την μάσκα κόλλησης (solder mask) και τη μεταξοτυπία (silkscreen).
- Excellon (αρχείο τρυπανιού): Περιέχει τις προδιαγραφές, το μέγεθος και τις συντεταγμένες του τρυπανιού.
- G-Code: Οδηγίες μηχανής CNC για φρεζάρισμα, διάτρηση και κοπή.

Αυτά τα αρχεία προέλευσης μπορούν να φορτωθούν επιλέγοντας *Αρχείο -> Άνοιγμα Gerber...*, *Αρχείο -> Άνοιγμα Excellon...*, *Αρχείο -> Άνοιγμα G-Code...* αντίστοιχα. Τα αντικείμενα που δημιουργούνται από τα αρχεία προέλευσης προστίθενται αυτόματα στο τρέχον έργο (project) κατά τη φόρτωση.

Η λειτουργία του FlatCam είναι βασισμένη σε τέσσερις τύπους αντικειμένων, οι οποίοι εκπροσωπούν τη ροή εργασίας από τον σχεδιασμό στην παραγωγή: Gerber, Excellon, Geometry και CNC Job.

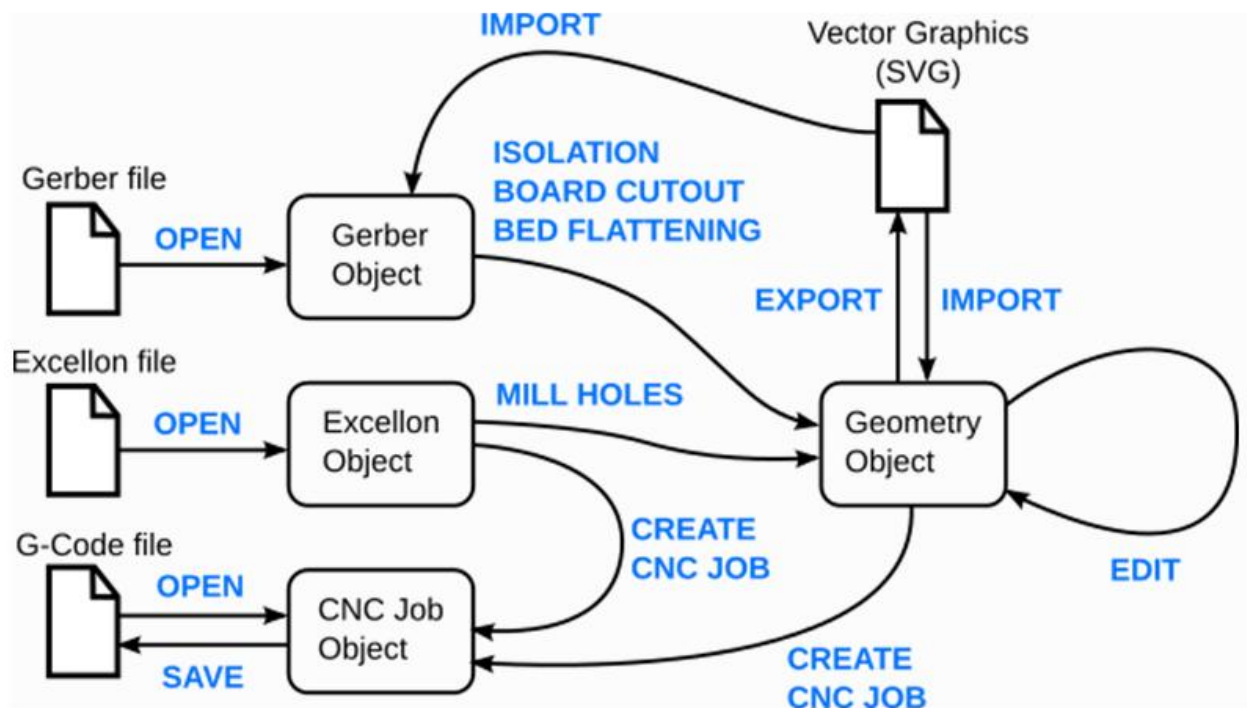
Τα αντικείμενα Gerber (Gerber Object), ενσωματώνουν την είσοδο των γεωμετρικών δεδομένων (χαλκός, περιγράμματα) και είναι η αφετηρία της δημιουργίας διαδρομών απομόνωσης (Isolation Routing).

Τα αντικείμενα τρυπανιών (Excellon Object), αξιοποιούνται για τις εργασίες διάτρησης (Drilling), ορίζοντας τις συντεταγμένες και τις διαμέτρους των οπών της πλακέτας.

Τα αντικείμενα γεωμετρίας (Geometry Object) είναι ενδιάμεσα αντικείμενα επεξεργασίας που επιτρέπουν την τροποποίηση των διαδρομών, τον ορισμό των παραμέτρων του εργαλείου και τη δημιουργία σχημάτων που δεν υπήρχαν στα αρχικά αρχεία. Απεικονίζουν την ακριβή διαδρομή που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο.

Το αντικείμενο εργασίας CNC (CNC Job Object), είναι το τελικό στάδιο, όπου οι γεωμετρικές διαδρομές μετατρέπονται σε κώδικα G-Code, έτοιμος για εκτέλεση από την εργαλειομηχανή CNC.

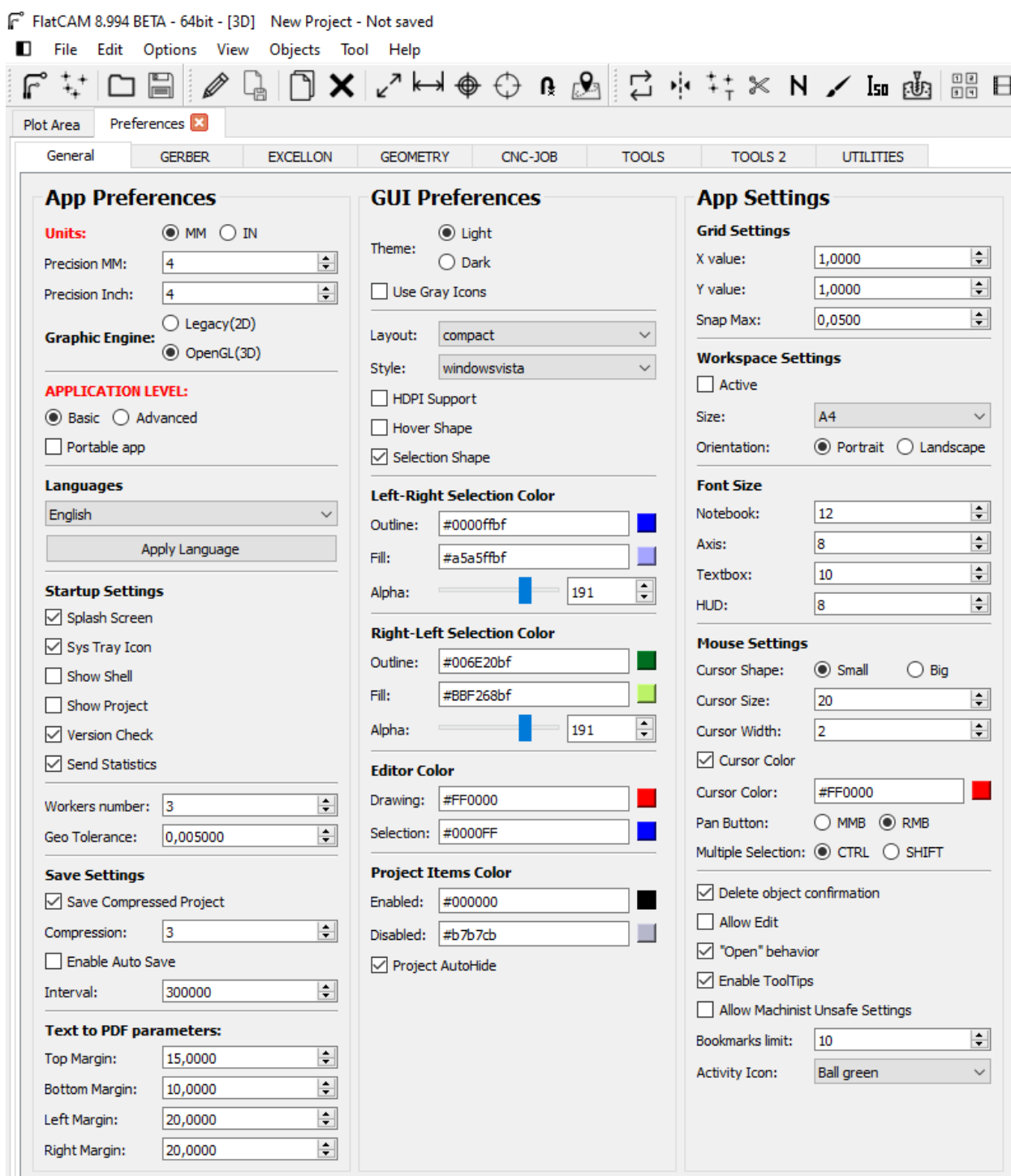
Το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 54 προβάλλει τη σχέση μεταξύ αρχείων προέλευσης και των αντικειμένων:



Εικόνα 54: Το Project tree του FlatCAM.

4.5.2 Προεπιλεγμένες Ρυθμίσεις στο FlatCAM

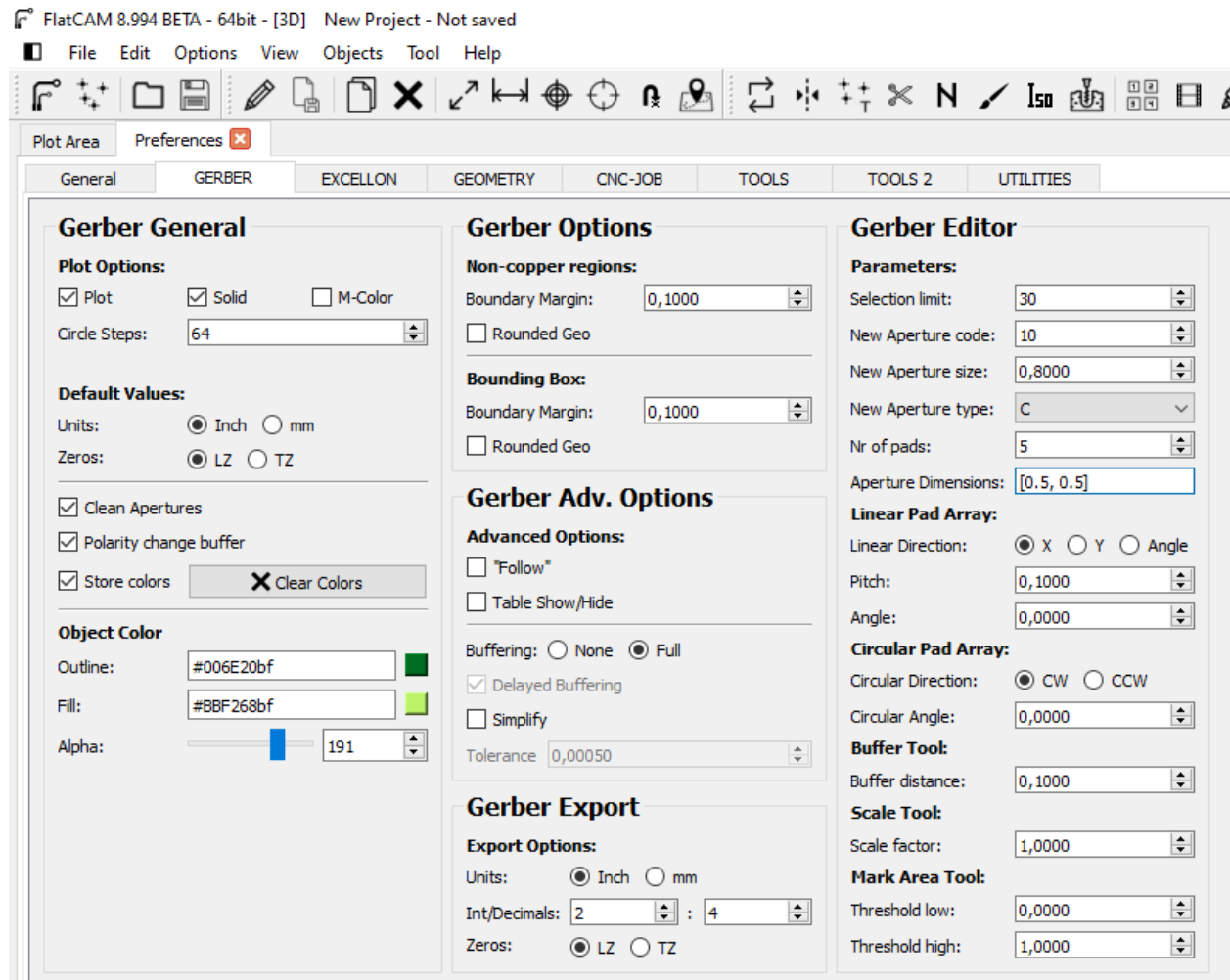
Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στο FlatCAM είναι απαιτούμενες γιατί εξασφαλίζουν τη σωστή ερμηνεία των αρχείων σχεδιασμού Gerber και Excellon. Μειώνουν το χρόνο προετοιμασίας κάθε νέου έργου και διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία της CNC μηχανής. Από το μενού Edit -> Preferences προβάλλεται η καρτέλα ελέγχου για τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του προγράμματος. Η καρτέλα διαχωρίζεται σε υπό ενότητες που καλύπτουν κάθε πτυχή της παραγωγής πλακετών PCB. Οι αλλαγές εφαρμόζονται αυτόματα σε κάθε νέο project, εξοικονομώντας χρόνο από τη χειροκίνητη εισαγωγή παραμέτρων.



Εικόνα 55: Παραμετροποίηση γενικών προτιμήσεων του FlatCAM για την εξαγωγή αρχείων G-code.

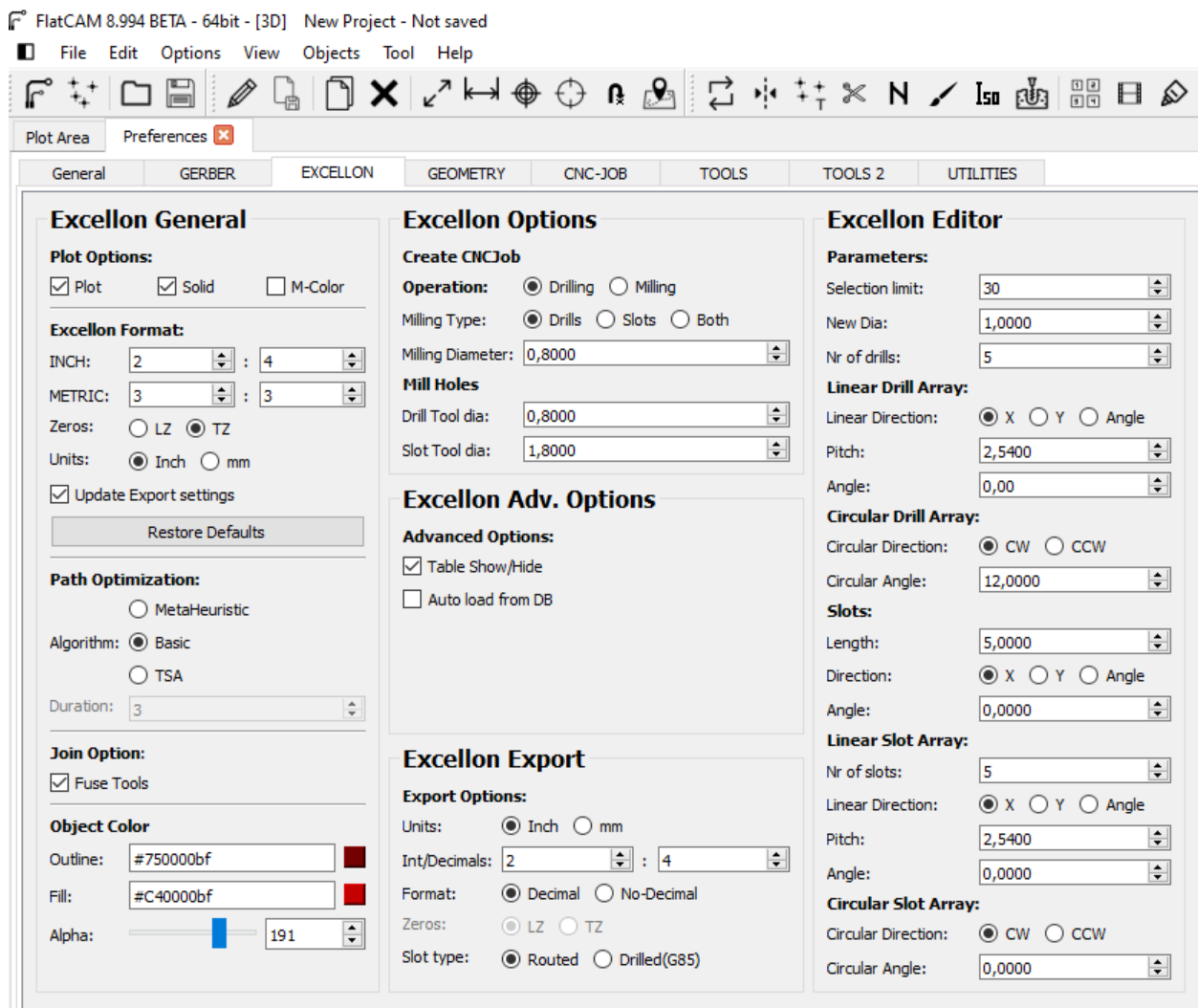
Η Εικόνα 55 αποτυπώνει το παράθυρο γενικών προτιμήσεων (**General Preferences**) του λογισμικού FlatCAM, όπου καθορίζονται οι αρχικές παράμετροι για τη μετέπειτα εξαγωγή του κώδικα CNC (G-code). Στην πρώτη στήλη (App Preferences), επιλέγονται οι μονάδες μέτρησης (Units) σε χιλιοστά (MM) ή ίντσες (IN) και ο ορίζεται η ακρίβειας των δεκαδικών ψηφίων (Precision MM/Inch), όπου επηρεάζουν άμεσα τις συντεταγμένες X, Y και Z που θα εγγραφούν στο τελικό αρχείο G-code. Επιπλέον, η ρύθμιση της γεωμετρικής ανοχής (Geo Tolerance) είναι

καθοριστική για την ακρίβεια της μετατροπής των διανυσματικών σχεδίων σε τροχιές κοπής, εξασφαλίζοντας ότι η επεξεργασία των τόξων και των καμπυλών από τη μηχανή CNC θα γίνει εντός των επιτρεπτών ορίων σφάλματος του μηχανήματος. Οι ρυθμίσεις αυτές αποτελούν το υπόβαθρο για τη σωστή διερμηνεία των γεωμετρικών δεδομένων και την αποφυγή σφαλμάτων κατά τη φάση της κατεργασίας.



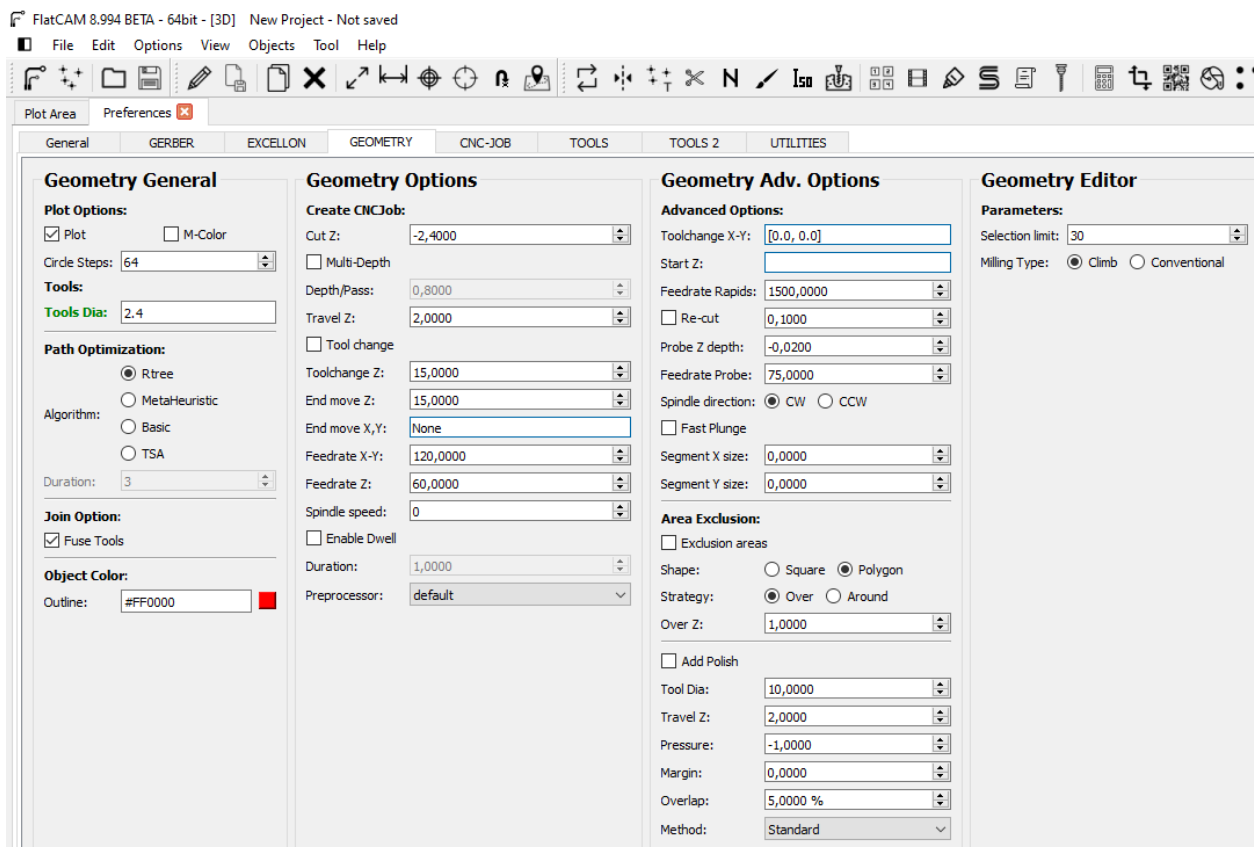
Εικόνα 56: Παραμετροποίηση αρχείων Gerber στο FlatCAM για τη διαδικασία χάραξης απομόνωσης (isolation routing).

Στο στιγμιότυπο της Εικόνα 56 αποτυπώνεται η καρτέλα εξειδικευμένων ρυθμίσεων για τα αρχεία Gerber (**Gerber Preferences**) στο λογισμικό FlatCAM, η οποία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ακριβή γεωμετρική διερμηνεία των επιπέδων (layers) του PCB. Η σωστή παραμετροποίηση των ενότητων "Gerber General" και "Gerber Options" είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνικής χάραξης απομόνωσης (isolation routing). Μέσω του καθορισμού των προεπιλεγμένων μονάδων (Default Values) και των περιθωρίων των μη αγωγίων περιοχών (Boundary Margin), το λογισμικό υπολογίζει με ακρίβεια τις τροχιές που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο για τον διαχωρισμό των αγωγίων διαδρομών χαλκού. Η ακρίβεια αυτή είναι απαραίτητη τόσο για την κατεργασία πλακετών μονής όψευς, όσο και για τις πλακέτες διπλής όψευς, όπου η παραμικρή γεωμετρική απόκλιση ή σφάλμα κλίμακας κατά την εισαγωγή των αρχείων Gerber μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ευθυγράμμισης μεταξύ του πάνω και του κάτω layer κατά τη διαδικασία της ανάστροφης χάραξης.



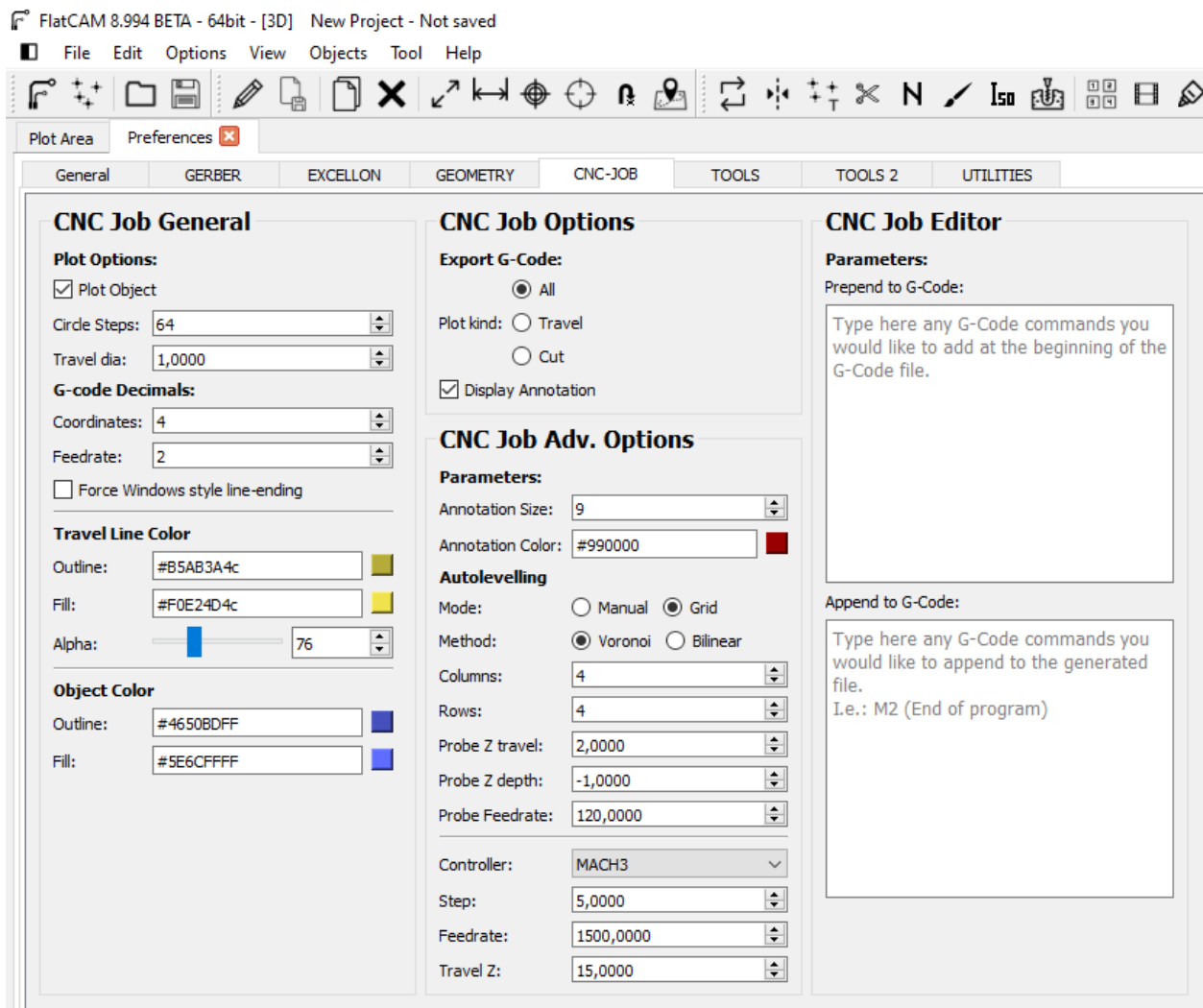
Εικόνα 57: Παραμετροποίηση αρχείων Excellon στο FlatCAM για συνδυασμένες λειτουργίες διάτρησης και φρεζαρίσματος.

Στην Εικόνα 57 αποτυπώνεται η καρτέλα προτιμήσεων για τα αρχεία Excellon (**Excellon Preferences**) στο λογισμικό FlatCAM, η οποία επιτρέπει τον ακριβή προγραμματισμό των μηχανικών κατεργασιών για τη δημιουργία των οπών της πλακέτας. Η σωστή διαχείριση της ενότητας "Excellon Options" είναι κομβικής σημασίας, καθώς επιτρέπει τον διαχωρισμό των εργασιών σε κλασική διάτρηση (Drilling) και σε κυκλικό φρεζάρισμα (Milling). Στην περίπτωση των τυπικών οπών για through-hole εξαρτήματα ή διόδους διασύνδεσης (vias), επιλέγεται η λειτουργία Drilling με βάση την ονομαστική διάμετρο του τρυπανιού (Drill Tool dia). Αντίθετα, για μεγαλύτερες οπές ή επιμήκεις σχισμές (slots) που ξεπερνούν τις τυπικές διαστάσεις των διαθέσιμων τρυπανιών, το FlatCAM παραμετροποιείται για τη λειτουργία Milling. Με τον καθορισμό της διαμέτρου του κοπτικού (Mill Holes / Slot Tool dia), το λογισμικό παράγει μια ελικοειδή ή γραμμική τροχιά (routing path), επιτρέποντας στη μηχανή CNC να διαμορφώσει τις εξατομικευμένες γεωμετρίες με απόλυτη ακρίβεια. Αυτός ο συνδυασμένος προγραμματισμός εξασφαλίζει τη σταθερή τοποθέτηση και εφαρμογή των εξαρτημάτων και τη γεωμετρική πιστότητα της πλακέτας.



Εικόνα 58: Παραμετροποίηση προτιμήσεων γεωμετρίας (Geometry Preferences) στο FlatCAM για τον καθορισμό των παραμέτρων κοπής CNC.

Στην Εικόνα 58 αποτυπώνεται η καρτέλα προτιμήσεων γεωμετρίας (**Geometry Preferences**) του λογισμικού FlatCAM, η οποία αποτελεί τον πυρήνα του μηχανικού προγραμματισμού για τη χάραξη απομόνωσης (isolation routing). Στην κεντρική ενότητα "Geometry Options" καθορίζονται οι θεμελιώδεις παράμετροι της κατεργασίας, όπως το τελικό βάθος κοπής (**Cut Z**) και το ύψος ασφαλούς μετακίνησης του εργαλείου πάνω από την πλακέτα (**Travel Z**). Παράλληλα, ορίζονται οι ταχύτητες πρόωσης στους άξονες (Feedrate X-Y και Feedrate Z), οι οποίες υπαγορεύουν ρυθμούς κίνησης συμβατούς με τις αντοχές των λεπτών κοπτικών V-bit. Στην ενότητα "Geometry Adv. Options" περιλαμβάνονται προχωρημένες ρυθμίσεις για την ταχύτητα της ταχείας μετακίνησης (**Feedrate Rapids**), τις παραμέτρους της επιφάνειας μηδενισμού (**Probe Z depth**) και τη φορά περιστροφής της κεφαλής (Spindle direction). Τέλος, στην ενότητα "Geometry Editor" επιλέγεται ο τύπος φρεζαρίσματος (Milling Type) μεταξύ σύγχρονης (Climb) και αντίθετης (Conventional) κοπής. Η λεπτομερής αυτή ρύθμιση εξασφαλίζει τη δημιουργία ενός σταθερού G-code, προστατεύοντας τα εργαλεία από θραύση και εξασφαλίζοντας καθαρά περιγράμματα χαλκού χωρίς γρέζια.



Εικόνα 59: Ρυθμίσεις εξαγωγής G-code και παραμέτρων ψηφιακής ισοστάθμισης επιφάνειας στην καρτέλα CNC Job.

Στην Εικόνα 59 παρουσιάζεται η καρτέλα **Preferences -> CNC JOB** του FlatCAM, η οποία ορίζει τις τελικές παραμέτρους για τη δημιουργία και την εξαγωγή του αρχείου G-code. Στην ενότητα "**CNC Job General**" καθορίζεται η ακρίβεια των συντεταγμένων μέσω των δεκαδικών ψηφίων (G-code Decimals), εξασφαλίζοντας τη συμβατότητα με τις απαιτήσεις του ελεγκτή. Εξαιρετικά σημαντική για την κατασκευή PCB είναι η κεντρική ενότητα "**Autolevelling**", η οποία επιτρέπει τη δημιουργία ενός πλέγματος ανίχνευσης (Grid Mode) για τη χαρτογράφηση των μικρο-αποκλίσεων στο ύψος της επιφάνειας της πλακέτας. Η επιλογή της μεθόδου Voronoi ή Bilinear και ο ορισμός των σημείων μέτρησης (Columns/Rows) επιτρέπουν στο λογισμικό να αντισταθμίσει την έλλειψη απόλυτης επιπεδότητας του χαλκού, προσαρμόζοντας δυναμικά το βάθος κοπής Z κατά την κατεργασία. Τέλος, στην ενότητα "**CNC Job Options**" επιλέγεται ο κατάλληλος μεταφραστής κώδικα (Controller: MACH3), ενώ ο "**CNC Job Editor**" επιτρέπει την εισαγωγή προσαρμοσμένων εντολών στην αρχή (Prepend) και στο τέλος (Append) του προγράμματος, όπως ο έλεγχος της κεφαλής ή η επιστροφή στην αρχική θέση ασφαλείας.

The screenshot displays the 'TOOLS' preferences window in FlatCAM. The 'Isolation Tool Options' panel is active, showing parameters like 'Tools Dia: 0.1', 'Tool order: Reverse', 'V-Tip Dia: 0.1000', 'V-Tip Angle: 30.0000', 'Cut Z: -0.0500', and 'New Dia: 0.1000'. Other panels like 'Drilling Tool Options' and 'NCC Tool Options' are also visible, showing settings for drilling and non-copper clearance respectively. The 'Paint Tool Options' panel shows 'Tools Dia: 0.3' and 'Tool Type: Circular'. The 'Transform Tool Options' panel shows 'Reference: Selection' and 'Point: [0, 0]'. The 'Corner Markers Options' panel shows 'Type: Semi-Cross' and 'Cross'. The 'Calculators Tool Options' panel shows 'V-Shape Tool Calculator' with 'Tip Diameter: 0.2000' and 'Tip Angle: 30.0000'.

Εικόνα 60: Παραμετροποίηση προτιμήσεων εργαλείων (Tools Preferences) στο FlatCAM για τις διεργασίες χάραξης, διάτρησης και επεξεργασίας PCB.

Στην Εικόνα 60 παρουσιάζεται η καρτέλα **Preferences -> TOOLS** του FlatCAM, η οποία συγκεντρώνει τις βασικές παραμέτρους για κάθε ξεχωριστή φάση της μηχανικής κατεργασίας του PCB. Στην πρώτη στήλη, υπό την ενότητα "*Isolation Tool Options*", καθορίζονται οι προδιαγραφές του εργαλείου χάραξης (Tools Dia: 0.1 mm, V-Tip Dia: 0.1000 mm, V-Tip Angle: 30.0000 deg), οι οποίες αντιστοιχούν στο V-bit κονδύλι που χρησιμοποιείται για το isolation routing, με το βάθος κοπής (**Cut Z**) να ορίζεται στα -0.0500 mm για την καθαρή αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος χαλκού. Στη δεύτερη στήλη ("*Drilling Tool Options*"), ορίζονται οι παράμετροι για τη διάτρηση, με το βάθος κοπής (**Cut Z**) στα -1.7000 mm, ώστε το τρυπάνι να διαπεράσει πλήρως το σώμα της πλακέτας FR4 (συνήθους πάχους 1.5 mm ή 1.6 mm) μαζί με ένα μικρό περιθώριο ασφαλείας. Παράλληλα, οι ενότητες "*NCC Tool Options*" (Non-Copper Clearance) και "*Paint Tool Options*" επιτρέπουν τη ρύθμιση εργαλείων για την πλήρη αφαίρεση μεγάλων περιοχών χαλκού, εξασφαλίζοντας ότι όλες οι διεργασίες θα εκτελεστούν με τις κατάλληλες ταχύτητες πρόωσης και γεωμετρίες εργαλείων.

The image shows the 'Tools 2' preferences window in FlatCAM, organized into several panels:

- Check Rules Tool Options:** Includes checkboxes for Trace Size, Copper to Copper clearance, Copper to Outline clearance, Silk to Silk Clearance, Silk to Solder Mask Clearance, Silk to Outline Clearance, Minimum Solder Mask Sliver, Minimum Annular Ring, Hole to Hole Clearance, and Hole Size. Each has a corresponding 'Min value' input field.
- Optimal Tool Options:** Includes a 'Precision' dropdown set to 4.
- QRCode Tool Options:** Includes Version, Error correction, Box Size, Border Size, QRCode Data (text area), and options for Polarity, Bounding Box, Fill Color, Back Color, and Selection limit.
- Fiducials Tool Options:** Includes Size, Margin, Mode (Auto/Manual), Second fiducial (Up/Down/None), Fiducial Type (Circular/Cross/Chess), and Line thickness.
- Copper Thieving Tool Options:** Includes Circle Steps, Clearance, Margin, Area, Reference, Box Type, Fill Type, and various grid parameters (Dots, Squares, Lines).
- Robber Bar Parameters:** Includes Margin, Thickness, and Pattern Plating Mask options.
- Calibration Tool Options:** Includes Source Type, Travel Z, Verification Z, Zero Z tool, Toolchange Z, Toolchange X-Y, and Second point.
- Extract Drills Options:** Includes Processed Pads Type, Method, and Fixed Diameter/Annular Ring/Proportional Diameter settings.
- Punch Gerber Options:** Includes Processed Pads Type, Method, and Fixed Diameter/Annular Ring/Proportional Diameter settings.
- Invert Gerber Tool Options:** Includes Margin, Lines Join Style, and Square/Bevel options.

Εικόνα 61: Παραμετροποίηση προχωρημένων εργαλείων (Tools 2) στο FlatCAM με έμφαση στις ανοχές ελέγχου.

Στην Εικόνα 61 παρουσιάζεται η καρτέλα **Preferences -> TOOLS 2** του FlatCAM, η οποία ενσωματώνει καθοριστικές λειτουργίες ελέγχου, αυτοματοποίησης και γεωμετρικών μετασχηματισμών. Στην πρώτη στήλη, υπό την ενότητα "**Check Rules Tool Options**", καθορίζονται οι ελάχιστες αποδεκτές ανοχές για τον έλεγχο των σχεδιαστικών κανόνων (Design Rule Check - DRC), όπως το ελάχιστο πάχος των διαδρομών (Trace Size: 0.2500 mm) και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ αγωγών (Copper to Copper clearance: 0.2500 mm). Οι τιμές αυτές διασφαλίζουν ότι οι αποστάσεις απομόνωσης δεν παραβιάζονται, αποτρέποντας βραχυκυκλώματα κατά τη χάραξη με ένα εργαλείο V-bit. Ιδιαίτερης σημασίας για τη διαδικασία είναι η ενότητα "**Fiducials Tool Options**", η οποία επιτρέπει την αυτόματη δημιουργία και τον καθορισμό γεωμετρικών σημείων αναφοράς (Fiducial Type: Circular, Size: 1.0000 mm). Η χρήση των fiducials είναι θεμελιώδης για την κατεργασία πλακετών διπλής όψευς, καθώς παρέχει στον ελεγκτή CNC (MACH3) σταθερά σημεία μηδενισμού και οπτικής ή μηχανικής ευθυγράμμισης, διασφαλίζοντας ότι το επάνω και το κάτω επίπεδο χαλκού θα συμπίπτουν με απόλυτη γεωμετρική ακρίβεια μετά την αναστροφή της πλακέτας.

4.5.3 Προετοιμασία Εργασιών CNC για την Κατασκευή Μονής Όψεως Πλακέτα με το Πρόγραμμα FlatCAM

Η προετοιμασία των εργασιών για την κατασκευή μιας πλακέτας μονής όψεως στο FlatCAM περιλαμβάνει τη μετατροπή των αρχείων προέλευσης Gerber και Excellon, από ένα πρόγραμμα CAD, σε G-Code, για να ακολουθήσει το φρεζάρισμα και η διάτρηση από τη μηχανή CNC WEGSTR. Για μια πλακέτα μονής όψεως, η διαδικασία ακολουθεί τα παρακάτω βασικά στάδια:

- Εισαγωγή του αρχείου Gerber (Bottom Layer ή το Top Layer) για τις διαδρομές και εισαγωγή του αρχείου Excellon για τις οπές.
- Απομόνωση των διαδρομών (Isolation Routing), για τη δημιουργία αντικείμενου γεωμετρίας (Generate Geometry).
- Δημιουργία CNC Job για τις διαδρομές από το νέο αντικείμενο γεωμετρίας (_iso) που δημιουργήθηκε και εξαγωγή του G-Code.
- Προετοιμασία των τρυπανιών (Drilling) από το αρχείο Excellon, για τη δημιουργία του CNC Job και την εξαγωγή του G-Code.
- Κοπή του περιγράμματος της πλακέτας.

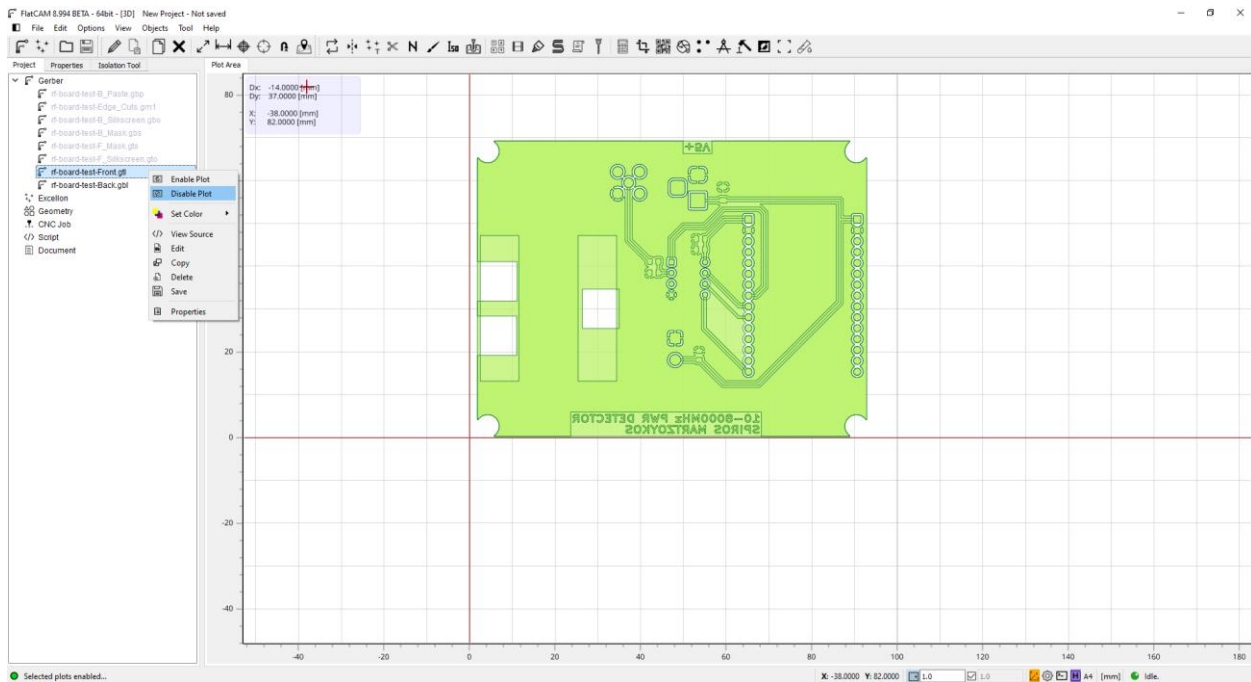
Στο FlatCAM η ροή εργασίας βασίζεται σε τέσσερις τύπους αντικειμένων. Κάθε αντικείμενο αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό στάδιο επεξεργασίας, από το αρχικό σχέδιο μέχρι τον τελικό κώδικα G-Code κατάλληλο για χρήση από τη μηχανή CNC WEGSTR. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα αντικείμενα (Objects) που αντιπροσωπεύουν ένα υποσύνολο των εργασιών που μπορούν να εκτελεστούν από το FlatCAM.

4.5.3.1 Gerber Object

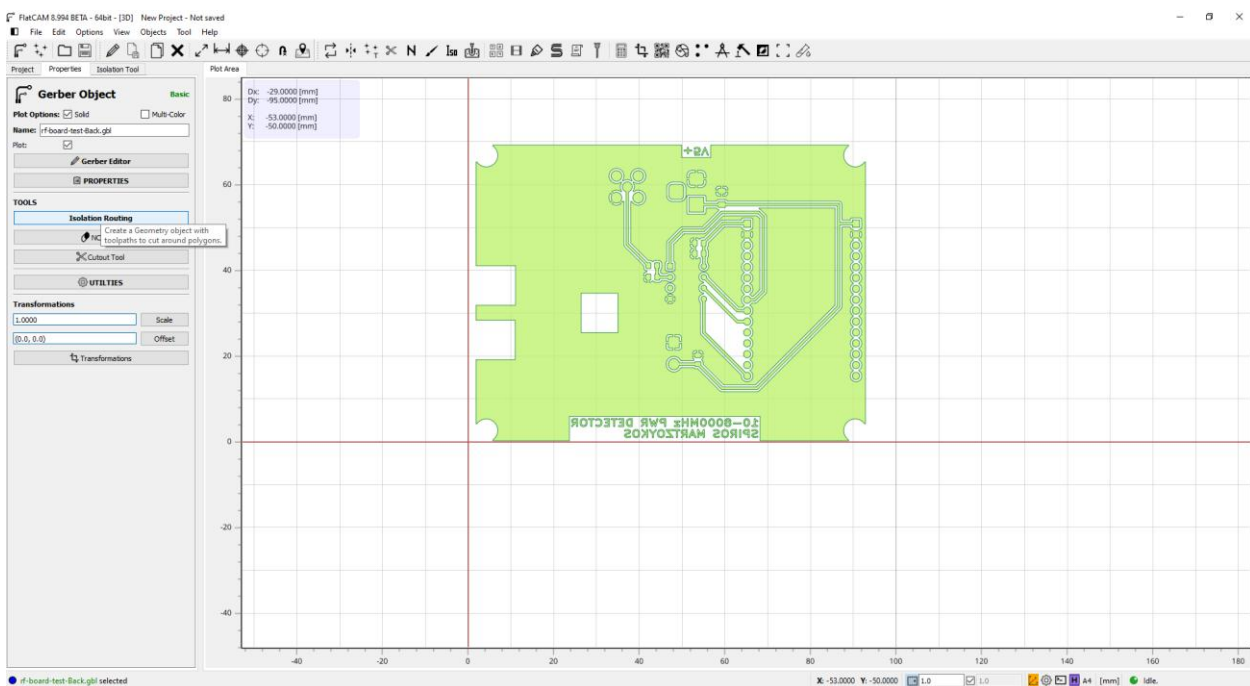
Το αντικείμενο Gerber Object, δημιουργείται κατά την εισαγωγή αρχείων Gerber από το πρόγραμμα CAD. Περιλαμβάνει τις πληροφορίες για τα χάλκινα μονοπάτια (traces) και τις επαφές (pads). Πληροφορίες για το εξωτερικό περίγραμμα και την κοπή της πλακέτας, καθώς και πληροφορίες για την εκτύπωση κειμένου ή τη μάσκα κόλλησης. Παρακάτω προβάλλονται αναλυτικά τα βήματα, όπου από ένα Gerber Object δημιουργεί το Geometry Object, το ενδιάμεσο γεωμετρικό αντικείμενο, πριν την τελική παραγωγή του CNC Job (G-Code).

Από το μενού *File -> Open Gerber* γίνεται επιλογή του αρχείου που περιέχει τις διαδρομές χαλκού (traces) που θα χαραχθούν. Η ονομασία του αρχείου εξαρτάται από το πρόγραμμα σχεδίασης CAD. Συνήθως επιλέγεται για την πάνω πλευρά αρχείο με κατάληξη όπως .gtl (Gerber Top Layer) ή ονόματα όπως top.gbr ή F_Cu.gbr και για την κάτω πλευρά .gbl (Gerber Bottom Layer) ή ονόματα όπως bottom.gbr B_Cu.gbr. Τα υπόλοιπα αρχεία όπως τα κείμενα/ σχέδια (Silkscreen), η επικάλυψη (Solder Mask) ή το περίγραμμα της πλακέτας (Edge Cuts/Outline) απενεργοποιούνται (Disable Plot) με δεξί κλικ, σε κάθε ένα ξεχωριστά (βλ Εικόνα 62).

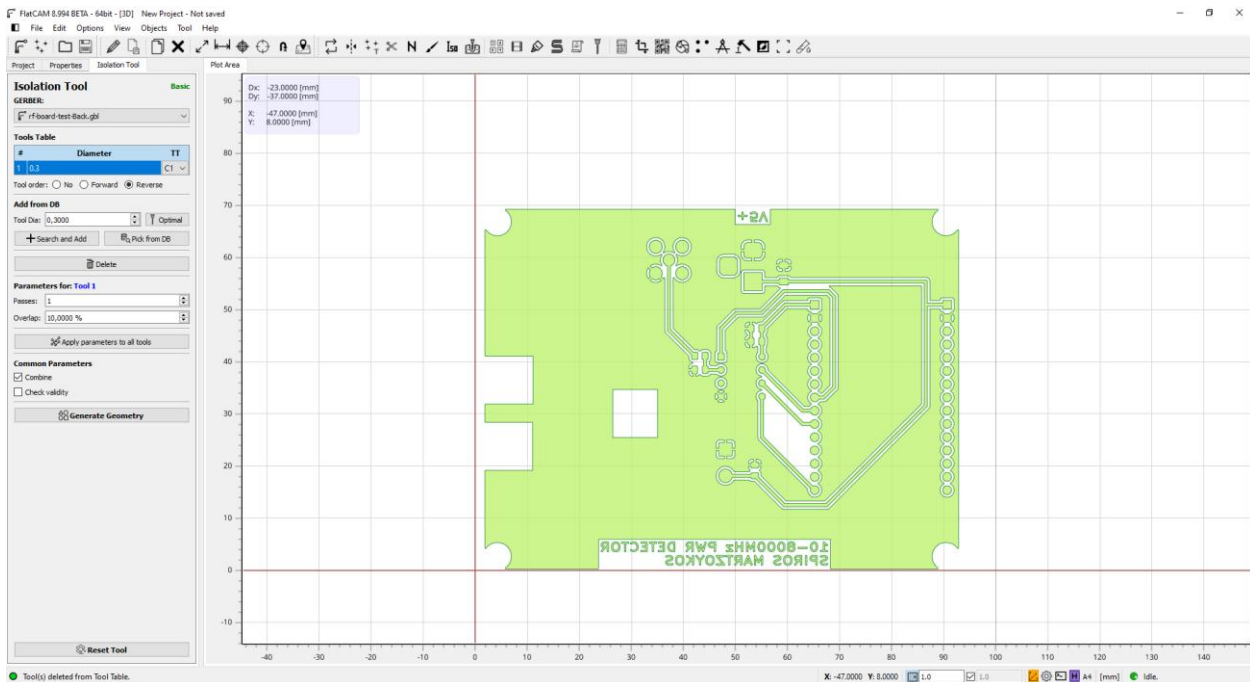
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 63, εισήχθη το αρχείο της κάτω όψης της πλακέτας (rf-board-test-back.gbl). Κατά την επεξεργασία πλακετών μονής όψεως, η χάραξη πραγματοποιείται αποκλειστικά σε αυτή την επιφάνεια, όπου τα κείμενα και οι διαδρομές εμφανίζονται καθρεφτισμένα για τη σωστή μετέπειτα τοποθέτηση των εξαρτημάτων στην επάνω πλευρά.



Εικόνα 62: Επιλογή του αρχείου .gtl που περιέχει τις διαδρομές που θα φρεζαριστούν.



Εικόνα 63: Η καρτέλα Properties, μετά από διπλό κλικ του επιλεγμένου αρχείου .gtl για τη δημιουργία της δρομολόγησης απομόνωσης (Isolation Routing).



Εικόνα 64: Η καρτέλα Isolation Routing.

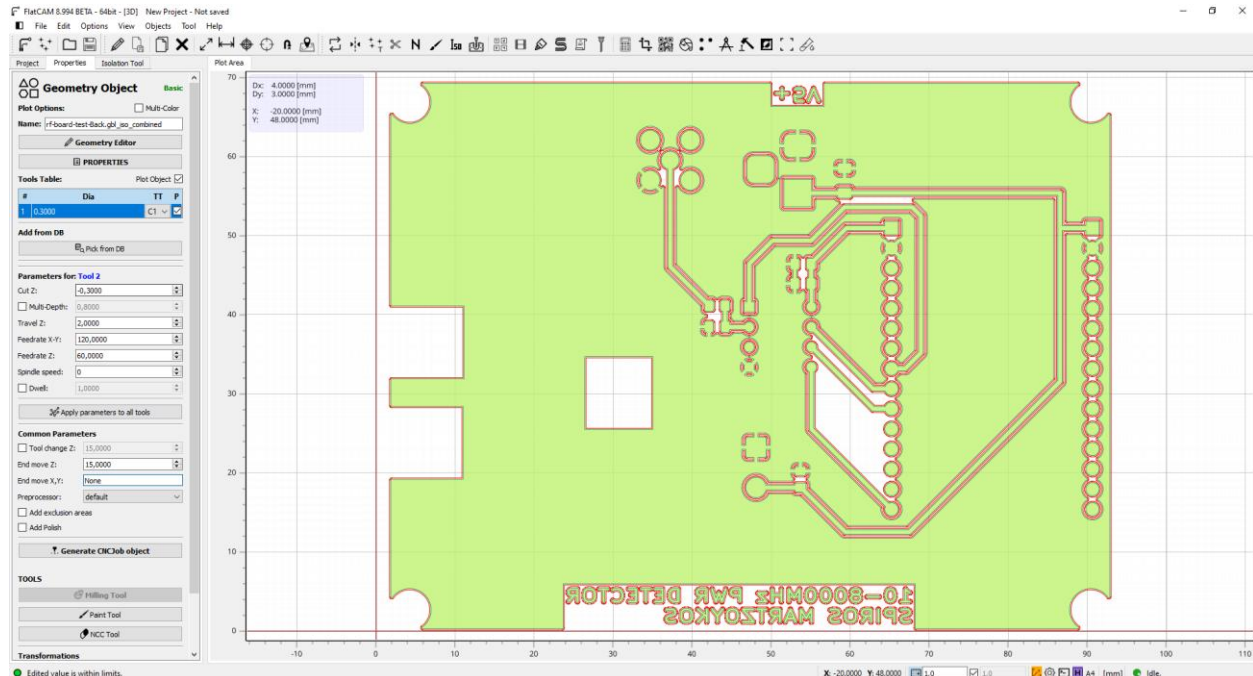
Στην Εικόνα 64 παρουσιάζεται το πρώτο στάδιο για την κατασκευή της πλακέτας είναι ο καθορισμός της διαδρομής που θα ακολουθήσει το εργαλείο για να διαχωρίσει ηλεκτρικά τους αγωγούς από τον υπόλοιπο χαλκό.

- **Επιλογή Εργαλείου (Tool Table):** Στο τμήμα αυτό ορίζεται η διάμετρος του εργαλείου (Diameter). Όπως φαίνεται στην εικόνα, επιλέχθηκε εργαλείο διαμέτρου 0.3 mm. Η σωστή δήλωση της διαμέτρου είναι σημαντική, καθώς το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα την απόσταση από τις ακμές των διαδρόμων, ώστε το τελικό πλάτος του χαλκού να παραμείνει ακριβές.
- **Παράμετροι Περσμάτων (Passes):** Η παράμετρος Passes καθορίζει πόσες φορές θα περάσει το εργαλείο περιμετρικά από κάθε διάδρομο. Με περισσότερα περάσματα αυξάνεται το κενό (clearance) μεταξύ των αγωγών, διευκολύνοντας τη μετέπειτα συγκόλληση και μειώνοντας την πιθανότητα βραχυκυκλωμάτων.
- **Επικάλυψη (Overlap):** Ορίζει το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των διαδοχικών περασμάτων, ώστε να διασφαλίζεται η πλήρης αφαίρεση του χαλκού στην ενδιάμεση περιοχή.

Με το πάτημα του κουμπιού Generate Geometry, το FlatCAM επεξεργάζεται τα δεδομένα του αρχείου Gerber και δημιουργεί ένα νέο αντικείμενο γεωμετρίας, συνήθως με κατάληξη _iso.

4.5.3.2 Geometry Object

Το αντικείμενο γεωμετρίας αποτελεί τη βασική γεωμετρική αναπαράσταση στο FlatCAM, όπου η γεωμετρία αποδίδεται από το δισδιάστατο επίπεδο στον τρισδιάστατο χώρο.



Εικόνα 65: Η καρτέλα Geometry Object

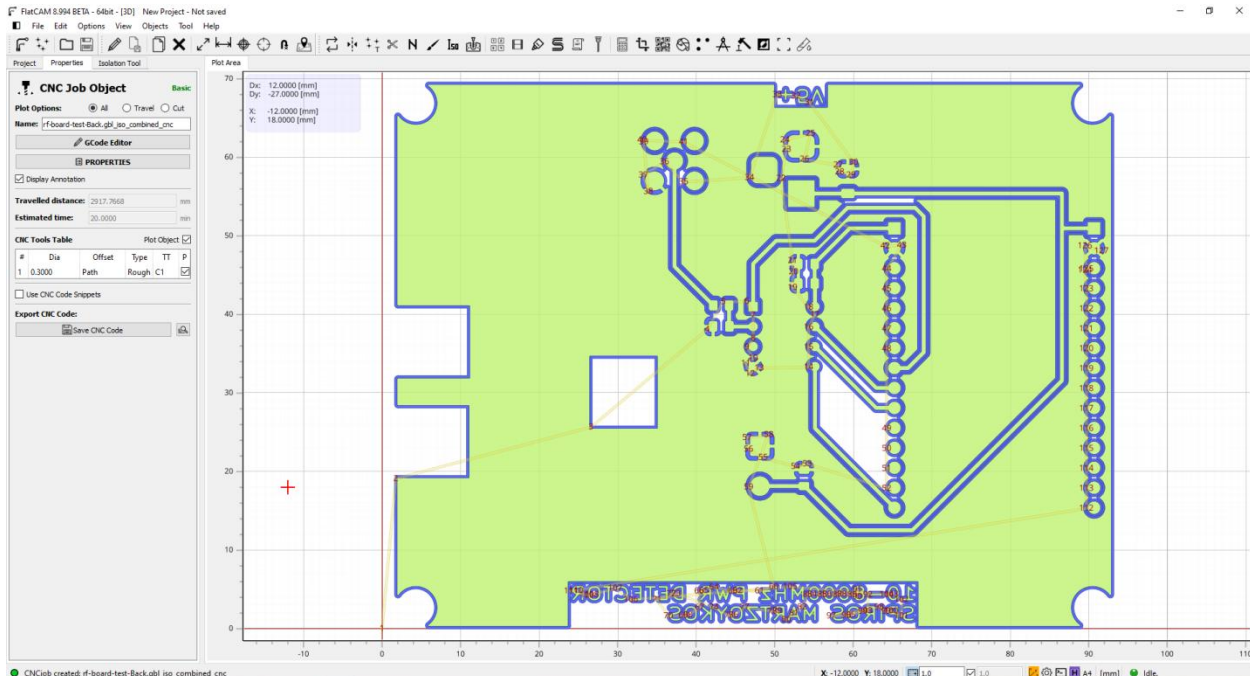
Στην καρτέλα Geometry Object (βλ Εικόνα 65), οι βασικές παράμετροι που ορίζονται είναι οι εξής:

- **Βάθος κοπής (Cut Z):** Καθορίζει το τελικό βάθος στο οποίο θα εισχωρήσει το εργαλείο (Endmill) εντός του χαλκού, για την πλήρη απομόνωση των διαδρομών (Isolation Routing), χωρίς υπερβολική φθορά του υποστρώματος, επιλέχθηκε η τιμή -0.3mm.
- **Ύψος μετακίνησης (Travel Z):** Ορίζεται το ύψος στο οποίο ανυψώνεται ο άξονας Z όταν μετακινείται από ένα σημείο στο άλλο χωρίς να αφαιρεί υλικό. Η τιμή ορίστηκε στα 2.0 mm για ασφάλεια, ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε επαφή του εργαλείου με την επιφάνεια της πλακέτας.
- **Ταχύτητα πρόωσης (Feed Rate XY):** είναι η ταχύτητα κίνησης του εργαλείου στους άξονες X-Y κατά το φρεζάρισμα. Η τιμή της εξαρτάται από τη σκληρότητα του υλικού (π.χ. FR4) και τη διάμετρο του εργαλείου (Endmill). Στόχος η αποφυγή θραύσης του εργαλείου και η γεωμετρική ακρίβεια ώστε οι διαδρομοί να έχουν ακριβώς το πλάτος που σχεδιάστηκε στο Gerber, χωρίς διακυμάνσεις. Όταν η ταχύτητα είναι σωστή, ο χαλκός φρεζάρεται καθαρά. Αν η ταχύτητα είναι λάθος, ο χαλκός μπορεί να «ξεφτίσει» ή να σηκωθεί στις άκρες, δημιουργώντας μικρά μεταλλικά υπολείμματα (γρέζια) που μπορεί να προκαλέσουν βραχυκυκλώματα.
- **Η ταχύτητα κατακόρυφης πρόωσης (Feed Rate Z):** είναι η ταχύτητα με την οποία το εργαλείο κατεβαίνει κάθετα για να εισχωρήσει στην πλακέτα. Η τιμή αυτή διατηρείται χαμηλότερη από την ταχύτητα XY για τον περιορισμό των κρουστικών φορτίων στην αιχμή του κοπτικού.

Με την ολοκλήρωση των ρυθμίσεων, εκτελείται η εντολή Generate CNCJob, η οποία παράγει το αντικείμενο εργασίας CNC. Στο στάδιο αυτό, το FlatCAM παρέχει μια οπτική επιβεβαίωση (μπλε χρωματισμός), επιτρέποντας τον τελικό έλεγχο των διαδρομών πριν την εξαγωγή του αρχείου G-Code.

4.5.3.3 CNCJob Object

Το αντικείμενο Geometry μετατρέπεται σε CNC Job, το οποίο είναι η οπτική αναπαράσταση της διαδρομής του εργαλείου.



Εικόνα 66: Η καρτέλα CNCJob Object αποθηκεύει το αρχείο με την κατάληξη όπως .nc ή .gcode για να το αναγνωρίσει το λογισμικό ελέγχου της CNC WEGSTR μηχανής.

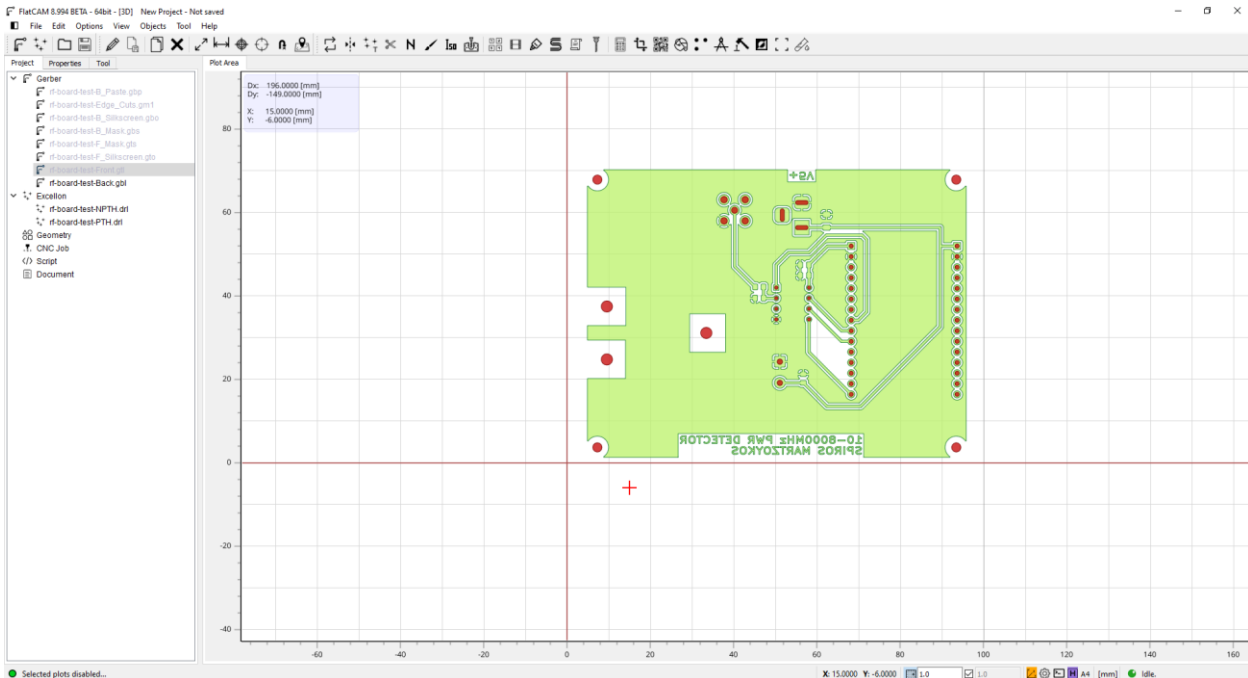
Μετά τον καθορισμό των παραμέτρων φρεζαρίσματος, παράγεται το αντικείμενο CNC Job (βλ. Εικόνα 66) το οποίο απεικονίζεται με μπλε χρώμα στο περιβάλλον του FlatCAM. Η οπτικοποίηση αυτή είναι σημαντική για τους εξής λόγους:

- **Επαλήθευση Διαδρομών:** Επιβεβαιώνεται οπτικά ότι το εργαλείο θα κινηθεί περιμετρικά όλων των αγωγίων διαδρομών, εξασφαλίζοντας την ηλεκτρική τους απομόνωση.
- **Έλεγχος Μετακινήσεων (Travel):** Οι ευθείες γραμμές που συνδέουν τα επιμέρους τμήματα του φρεζαρίσματος αναπαριστούν τις κινήσεις στον άξονα Travel Z. Σε αυτό το στάδιο, το εργαλείο ανυψώνεται στο προκαθορισμένο ύψος ασφαλείας και δεν πραγματοποιεί καμία αφαίρεση υλικού, προστατεύοντας την πλακέτα από τυχαίες χαράξεις.
- **Εκτίμηση Χρόνου:** Στην αριστερή στήλη (Properties), το FlatCAM υπολογίζει την συνολική απόσταση (Travelled distance) και τον εκτιμώμενο χρόνο (Estimated time) της κατεργασίας, επιτρέποντας στον χρήστη να αξιολογήσει την αποδοτικότητα των επιλεγμένων ταχυτήτων (Feed Rates).

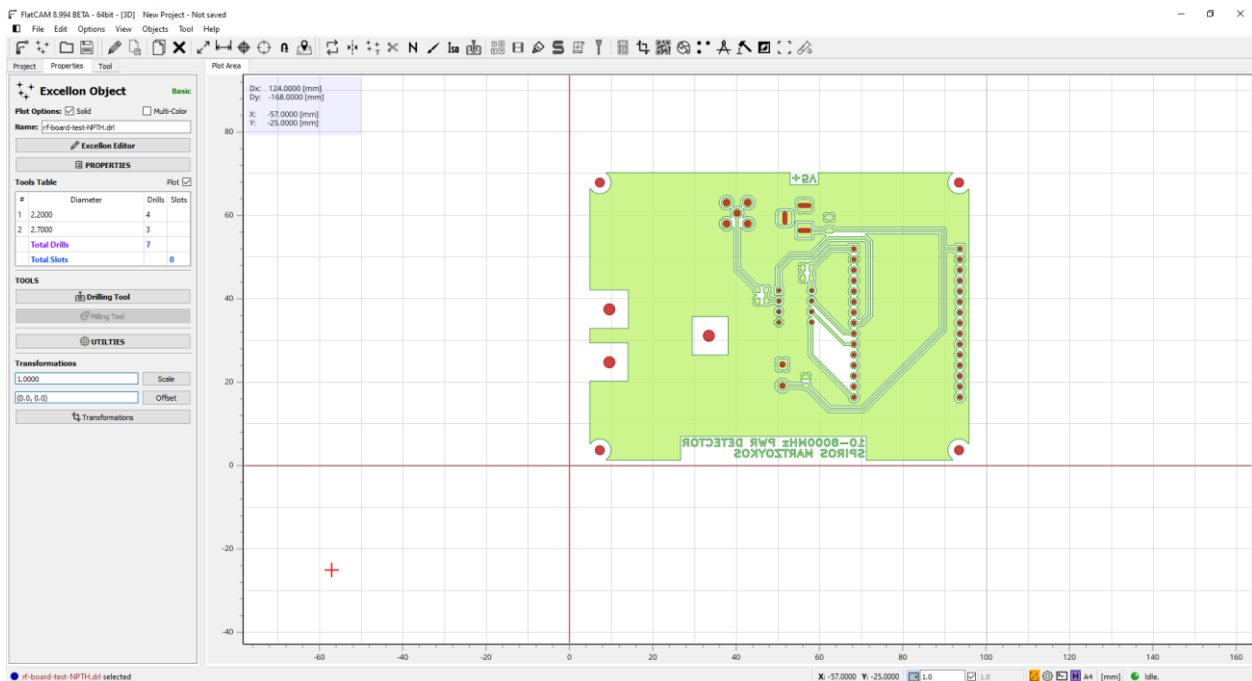
4.5.3.4 Excellon Objects

Τα αντικείμενα Excellon Objects (βλ. Εικόνα 67) δημιουργούνται από την εισαγωγή αρχείων Excellon, αρχεία με κατάληξη π.χ. .drl και περιέχουν πληροφορίες για τις οπές (holes) της πλακέτας, όπως τη θέση και τη διάμετρό τους. Στο FlatCAM τα αρχεία με την κατάληξη NPTH (Non Plated Through Hole) μη επιμεταλλωμένη διαμπερής οπή, εξυπηρετούν αποκλειστικά μηχανικούς σκοπούς και δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική σύνδεση. Χρησιμοποιούνται συνήθως για οπές στήριξης με βίδες, οπές ευθυγράμμισης ή για να περάσουν πλαστικά στηρίγματα. Η μεταλλικοποιημένη οπή PTH (Plated Through Hole) επιτρέπει την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων της πλακέτας.

Χρησιμοποιείται για τα ποδαράκια των εξαρτημάτων που πρέπει να κολληθούν και να έχουν επαφή με το κύκλωμα, καθώς και για τα νίσι που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μεταφορά σημάτων ή ισχύος.



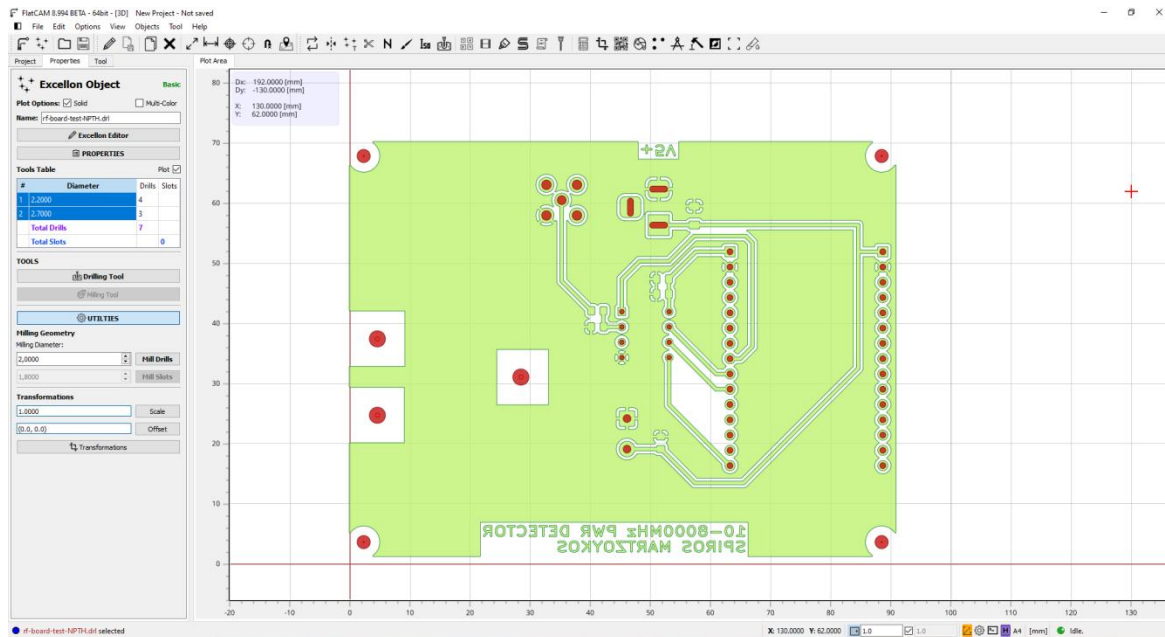
Εικόνα 67: Τα αρχεία Excellon έχουν κατάληξη NPTH.drl και PTH.drl.



Εικόνα 68: Η καρτέλα Excellon Object μετά από επιλογή του αρχείου NPTH.drl.

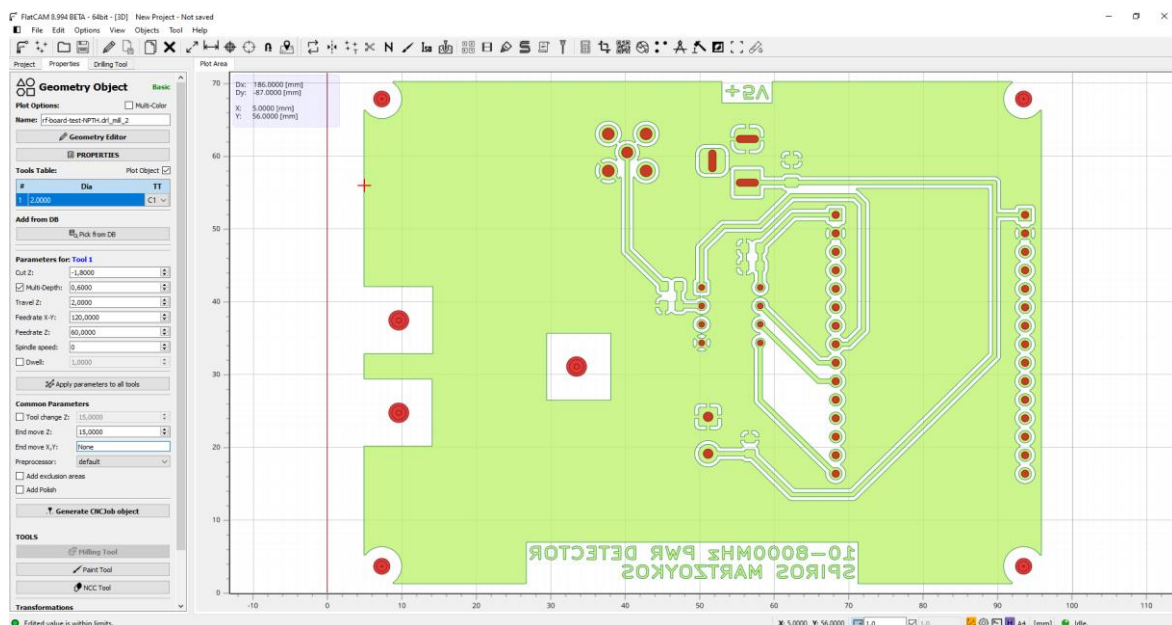
Στην καρτέλα της Εικόνας 68 παρατηρείται ο πίνακας Εργαλείων (Tools Table), όπου το λογισμικό αναγνωρίζει αυτόματα τις διαφορετικές διαμέτρους οπών που απαιτούνται για την διάτρηση των οπών NPTH. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως φαίνεται στην εικόνα, υπάρχουν δύο ομάδες

τρυπανιών: μία στα 2.2 mm (για 4 οπές) και μία στα 2.7 mm (για 3 οπές). Το FlatCAM προσφέρει τη δυνατότητα ομαδοποίησης και φρεζαρίσματος των οπών NPTH.



Εικόνα 69: Ομαδοποίηση και Φρεζάρισμα Οπών NPTH (Mill Drills).

Στην Εικόνα 69 μέσω του υπομενού Utilities, ορίστηκε η ακριβής δήλωση της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου στο πεδίο Milling Diameter, στα 2 mm. Επιλέγοντας Mill Drills εμφανίζεται το παράθυρο Geometry Object (Εικόνα 4.61), όπου ομαδοποιούνται οι οπές NPTH στο αρχείο Excellon, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές αλλαγές εργαλείων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και αυξάνοντας την παραγωγικότητα. Διασφαλίζεται ότι οι τελικές οπές NPTH θα έχουν τις σωστές διαστάσεις, ώστε να φρεζαριστούν από το ίδιο εργαλείο ενώ παράλληλα το πρόγραμμα ελέγχει αν το επιλεγμένο εργαλείο είναι αρκετά μικρό ώστε να εισχωρήσει στην περιοχή της οπής χωρίς να προκαλέσει φθορές σε γειτονικά αγωγικά στοιχεία (pads ή διαδρόμους).



Εικόνα 70: Από την καρτέλα Project επιλέγεται το νέο Geometry Object NPTH.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω στιγμιότυπο της Εικόνας 70 στο Tool Tables, επιλέχθηκε το φρεζάρισμα των οπών με ένα κοινό εργαλείο, εν προκειμένω διαμέτρου 2.0 mm, έναντι του κλασικού τρυπήματος (drilling). Τα οφέλη στην παραγωγική διαδικασία από την ομαδοποίηση των οπών και το φρεζάρισμα με μόνο ένα εργαλείο είναι:

- **Μείωση Χρόνου και Πολυπλοκότητας:** Αποφεύγονται οι πολλαπλές αλλαγές εργαλείων (tool changes) και ο επαναπροσδιορισμός του ύψους μηδενισμού (Z-zero) για κάθε διαφορετικό τρυπάνι. Αυτό μειώνει δραστικά τον συνολικό χρόνο κατεργασίας και την πιθανότητα ανθρώπινου λάθους.
- **Ομοιομορφία Κατασκευής:** Διασφαλίζεται ότι όλες οι οπές NPTH θα έχουν απόλυτα ομοιόμορφες διαστάσεις και ποιότητα κοπής, καθώς χρησιμοποιείται η ίδια κινηματική διαδρομή και το ίδιο εργαλείο.
- **Προστασία Πλακέτας:** Το FlatCAM εκτελεί αυτόματο έλεγχο σύγκρουσης. Αν το εργαλείο των 2 mm είναι πολύ μεγάλο για μια συγκεκριμένη περιοχή, το πρόγραμμα προειδοποιεί τον χρήστη, αποτρέποντας την καταστροφή γειτονικών διαδρομών ή pads.

Στο πεδίο Cut Z (Βάθος φρεζαρίσματος) τέθηκε η τιμή -1.8000 mm. Είναι μια εξαιρετική επιλογή για πλακέτα 1.6 mm, καθώς εξασφαλίζει ότι το εργαλείο θα περάσει οριακά την κάτω πλευρά της πλακέτας, δημιουργώντας μια "καθαρή" οπή χωρίς να καταπονεί υπερβολικά την πλατφόρμα της μηχανής CNC Wegstr.

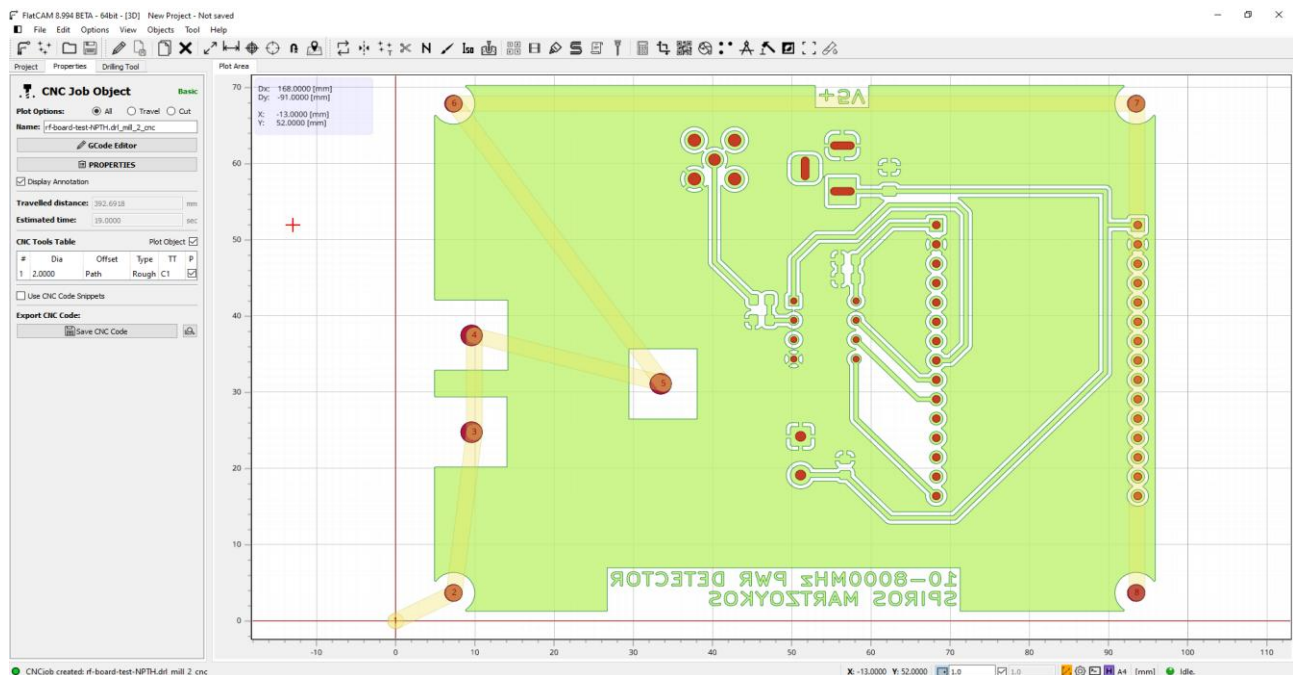
Για την αποφυγή υπερβολικής καταπόνησης ή θραύσης του κοπτικού εργαλείου κατά το φρεζάρισμα των οπών, ενεργοποιήθηκε η λειτουργία Multi-Depth. Με αυτή τη ρύθμιση, η αφαίρεση του υλικού γίνεται κλιμακωτά σε διαδοχικά περάσματα (steps). Συγκεκριμένα, ορίστηκε βάθος ανά πέρασμα (Depth/Pass) στα 0.6 mm, ώστε η τελική οπή βάθους 1.8 mm να ολοκληρωθεί σε τρεις επαναλήψεις. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την ομαλή αποβολή των ρινισμάτων και αποτρέπει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν το υλικό της πλακέτας.

Πρακτικά η μηχανή Wegstr θα κάνει τα εξής:

- Πρώτο πέρασμα: Θα κόψει σε βάθος -0.6 mm.
- Δεύτερο πέρασμα: Θα περάσει από την ίδια διαδρομή σε βάθος -1.2 mm.
- Τρίτο πέρασμα: Θα κάνει την τελική κοπή στο βάθος -1.8 mm.

Αν το εργαλείο 2 mm πήγαινε απευθείας στα 1.8 mm θα "ζοριζόταν" πολύ, οι κραδασμοί θα ήταν έντονοι και η κοπή θα μπορούσε να βγει "άγρια" ή να σπάσει το endmill. Με τον ορισμό της λειτουργίας Multi-Depth στα 0.6 mm ανά πέρασμα, η κοπή είναι πολύ πιο καθαρή και ασφαλής.

Οι υπόλοιπες παράμετροι της καρτέλας Geometry Object (όπως το Spindle Speed και το Dwell) διατηρήθηκαν στις προκαθορισμένες τιμές (default values) του λογισμικού FlatCAM, καθώς κάλυπταν πλήρως τις προδιαγραφές ασφαλείας και τις απαιτήσεις της κατεργασίας πλακετών. Επιλέγοντας Generate CNCJob Object εμφανίζεται το παρακάτω στιγμιότυπο με το νέο αντικείμενο CNCJob Object.



Εικόνα 71: Η καρτέλα CNCJob Object με τις τεχνικές παραμέτρους από όπου θα εξαχθεί το τελικό αρχείο G-Code που θα χρησιμοποιηθεί από τη μηχανή CNC WEGSTR.

Με την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης και την επιλογή Generate CNCJob Object, δημιουργείται το τελικό αντικείμενο εργασίας (βλ. Εικόνα 71). Σε αυτό το στάδιο, το FlatCAM παρέχει την τελική προεπισκόπηση και τις απαραίτητες πληροφορίες για την εκτέλεση της κατεργασίας:

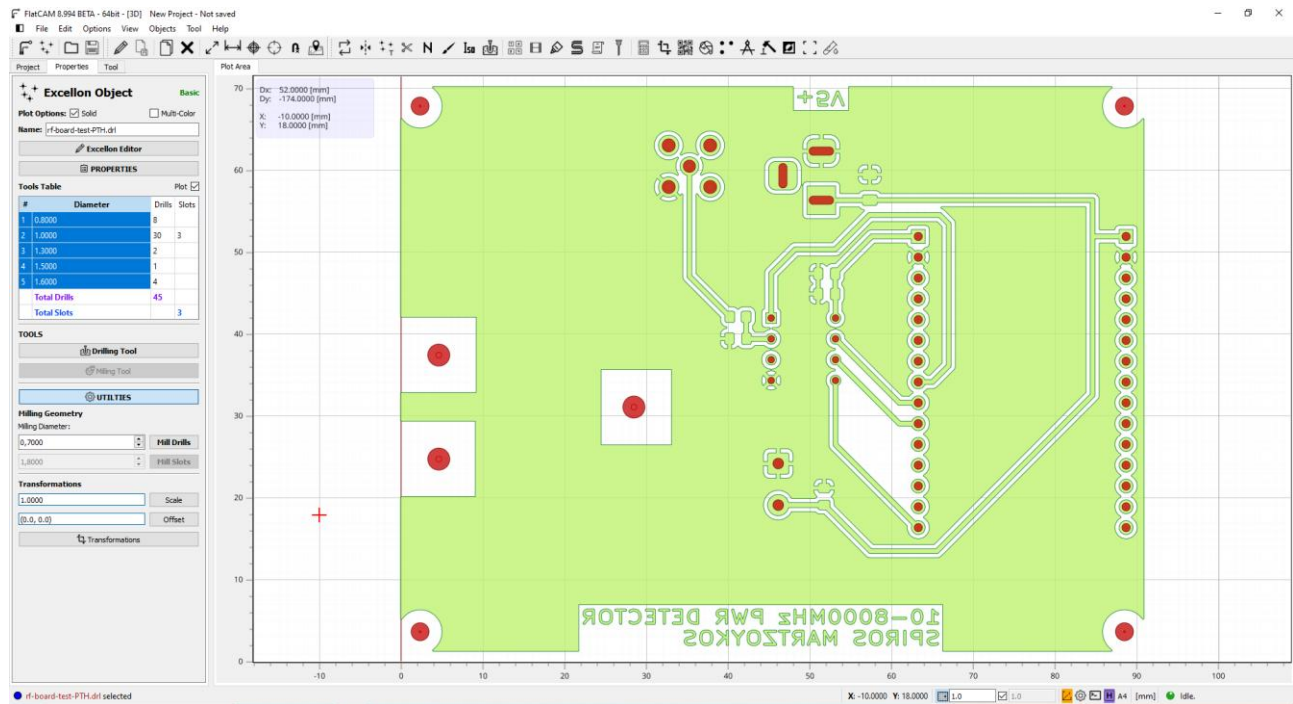
- **Οπτική Επιβεβαίωση:** Οι διαδρομές του εργαλείου εμφανίζονται πάνω στο σχέδιο της πλακέτας. Οι κύκλοι υποδεικνύουν τις περιοχές φρεζαρίσματος, ενώ οι γραμμές μετακίνησης (Travel) δείχνουν τη σειρά με την οποία η κεφαλή του CNC θα επισκεφθεί κάθε οπή.
- **Στατιστικά Στοιχεία (Properties):** Στο αριστερό μενού (Properties) εμφανίζεται η συνολική απόσταση που θα διανύσει το εργαλείο (Travelled distance) και ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης (Estimated time). Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν τον τελικό έλεγχο της αποδοτικότητας του προγράμματος.
- **Εξαγωγή G-Code:** Το τελικό βήμα είναι η επιλογή Save CNC Code. Με την εντολή αυτή, όλες οι ρυθμίσεις (συντεταγμένες, βάθος κοπής Z, ταχύτητες πρόωσης και πολλαπλά περάσματα Multi-Depth) μετατρέπονται σε ένα αρχείο κειμένου μορφής G-Code, το οποίο είναι άμεσα αναγνώσιμο από τη μονάδα ελέγχου της εργαλειομηχανής CNC.

Στο αριστερό μέρος, κάτω από το CNC Tools Table, διακρίνεται το εργαλείο με διάμετρο 2.0 mm που ορίστηκε για όλες τις οπές NPTH. Όλα είναι έτοιμα για την αποθήκευση του αρχείου με το κουμπί Save CNC Code.

Στη συνέχεια ακολουθεί το φρεζάρισμα των PTH οπών. Για την καλύτερη οργάνωση της παραγωγικής διαδικασίας και την αποφυγή σφαλμάτων, ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- **Διαχείριση Ορατότητας:** Από την καρτέλα Project, απενεργοποιήθηκε η απεικόνιση των αντικειμένων που αφορούσε τις οπές NPTH, ώστε το περιβάλλον εργασίας να παραμείνει καθαρό.
- **Ανάλυση Αρχείου Excellon:** Επιλέγοντας το αρχείο Excellon που περιέχει τις επιμεταλλωμένες οπές (PTH), ο πίνακας εργαλείων (Tools Table) εμφάνισε την ύπαρξη τρυπανιών με διαφορετικές διαμέτρους, εν προκειμένω πέντε διαφορετικά μεγέθη, από 0.8mm έως 1.5mm.
- **Ανάγκη για Milling:** Λόγω της ποικιλίας των διαμέτρων αυτών, η χρήση της λειτουργίας Mill Drills κρίνεται επιβεβλημένη. Με τον ορισμό ενός μονού κοπτικού εργαλείου, π.χ. 0.7mm, το λογισμικό αναλαμβάνει να δημιουργήσει όλες τις διαφορετικές οπές μέσω κυκλικής διαδρομής,

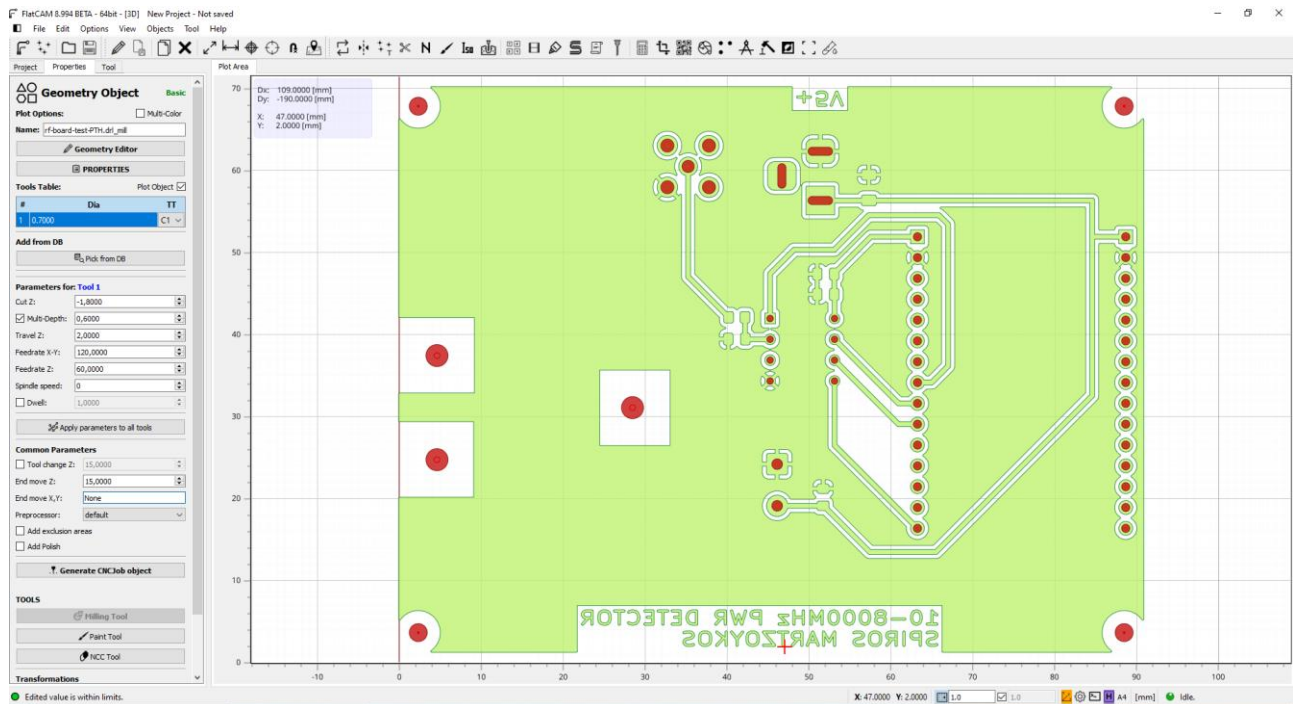
εξαλείφοντας την ανάγκη για πέντε διαφορετικά τρυπάνια και ισάριθμες αλλαγές εργαλείων στη μηχανή CNC Wegstr.



Εικόνα 72: Ορισμός του τρυπανιού 0.7 mm για το φρεζάρισμα των PTH οπών.

Για το φρεζάρισμα των οπών των εξαρτημάτων PTH (βλ. Εικόνα 72), ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία ομαδοποίησης μέσω του μενού Utilities, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία καταγωγής.

- **Ανάλυση Διαμέτρων:** Όπως φαίνεται στον πίνακα Tools Table, το αρχείο Excellon περιλαμβάνει πέντε διαφορετικές διαμέτρους οπών, από 0.8 mm έως 1.5 mm. Συνολικά αναγνωρίστηκαν 45 οπές.
- **Εργαλείο Φρεζαρίσματος (Milling Diameter):** Για την καταγωγή αυτών των οπών, ορίστηκε στο πεδίο Milling Diameter ένα εργαλείο διαμέτρου 0.7 mm. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε το εργαλείο να είναι μικρότερο από την ελάχιστη οπή του αρχείου (0.8 mm), επιτρέποντας στο λογισμικό να πραγματοποιήσει κυκλικό φρεζάρισμα (helical/circular milling) για κάθε οπή με ακρίβεια.
- **Ομογενοποίηση Κατεργασίας:** Με την εντολή Mill Drills, όλες οι PTH οπές, ανεξαρτήτως της αρχικής τους διαμέτρου στο σχέδιο, εντάσσονται σε μία ενιαία γεωμετρία καταγωγής. Έτσι, το CNC χρησιμοποιεί το ίδιο λεπτό κοπτικό με διάμετρο 0.7 mm για να «διαγράψει» την περίμετρο κάθε οπής, εξασφαλίζοντας ότι ακόμα και οι πιο μικρές οπές θα έχουν το σωστό μέγεθος για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων.

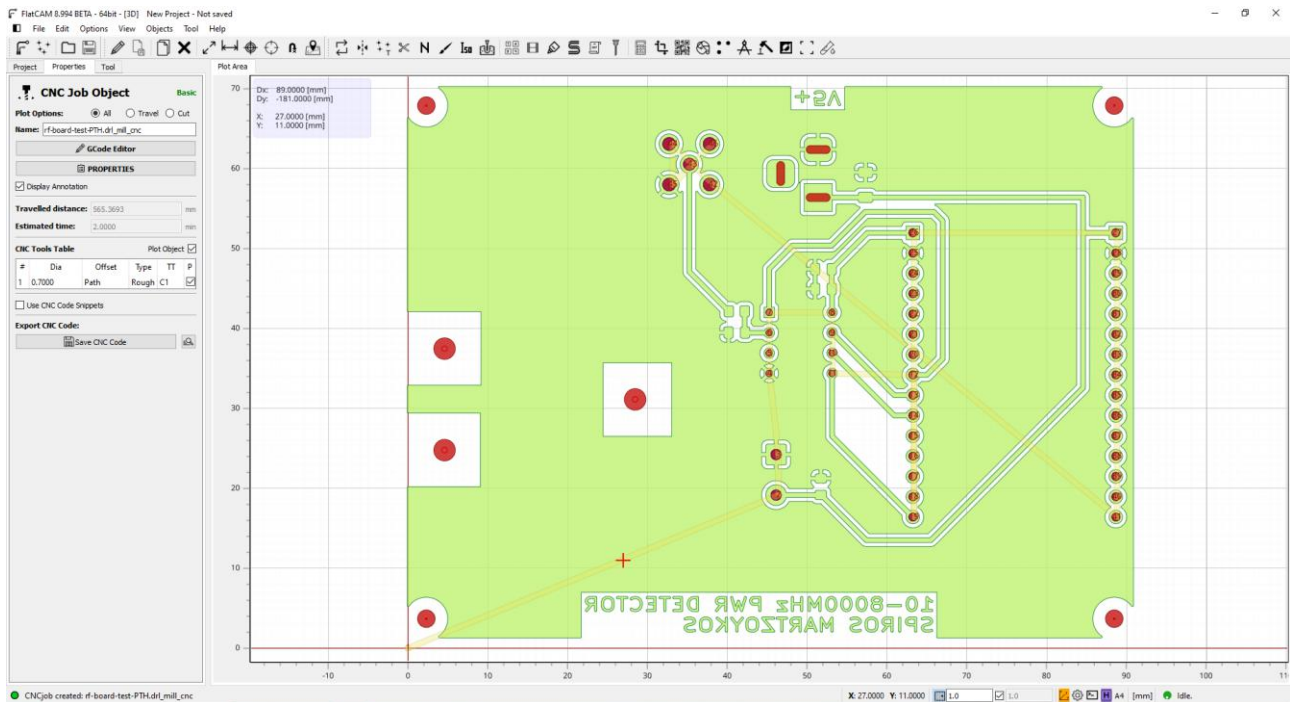


Εικόνα 73: Δημιουργία του αντικειμένου γεωμετρίας (Geometry Object) για τις οπές PTH, μετά την εφαρμογή της διαδικασίας Mill Drills.

Με την επιλογή της λειτουργίας Mill Drills, το FlatCAM παρήγαγε ένα νέο αντικείμενο γεωμετρίας, το οποίο περιλαμβάνει τις κυκλικές διαδρομές για όλες τις οπές PTH των εξαρτημάτων. Οι παράμετροι που ορίστηκαν στην καρτέλα Geometry Object, όπως φαίνεται στην Εικόνα 73 είναι οι εξής:

- Εργαλείο Κοπής (Tools Table): Επιβεβαιώνεται η χρήση εργαλείου διαμέτρου 0.7 mm. Η επιλογή αυτή επιτρέπει στη φρέζα CNC να εισχωρήσει ακόμα και στις μικρότερες οπές της πλακέτας (διαμέτρου 0.8 mm) και να διαγράψει την περίμετρό τους.
- Βάθος Κοπής (Cut Z): Ρυθμίστηκε στα -1.8 mm. Η τιμή αυτή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από το πάχος της πλακέτας 1.6 mm, εξασφαλίζοντας την πλήρη διάνοιξη των οπών και τη δημιουργία καθαρών ακμών στην κάτω πλευρά της πλακέτας.
- Λειτουργία Multi-Depth: Ενεργοποιήθηκε με βάθος ανά πέρασμα (Depth/Pass) στα 0.6 mm. Αυτό σημαίνει ότι το εργαλείο θα ολοκληρώσει κάθε οπή σε τρία διαδοχικά περάσματα, μειώνοντας την καταπόνηση του λεπτού κοπτικού των 0.7 mm και αποτρέποντας το σπάσιμό του.
- Ταχύτητες Πρόωσης (Feedrates): Ορίστηκαν στα 120 mm/min για την κίνηση XY και στα 60 mm/min για την κατακόρυφη βύθιση (Z), εξασφαλίζοντας μια ισορροπία μεταξύ ταχύτητας παραγωγής και ποιότητας κατεργασίας.

Με το πάτημα του κουμπιού Generate CNCJob object, οι παραπάνω γεωμετρικές πληροφορίες θα μετατραπούν σε συγκεκριμένες εντολές κίνησης για τη μηχανή CNC.



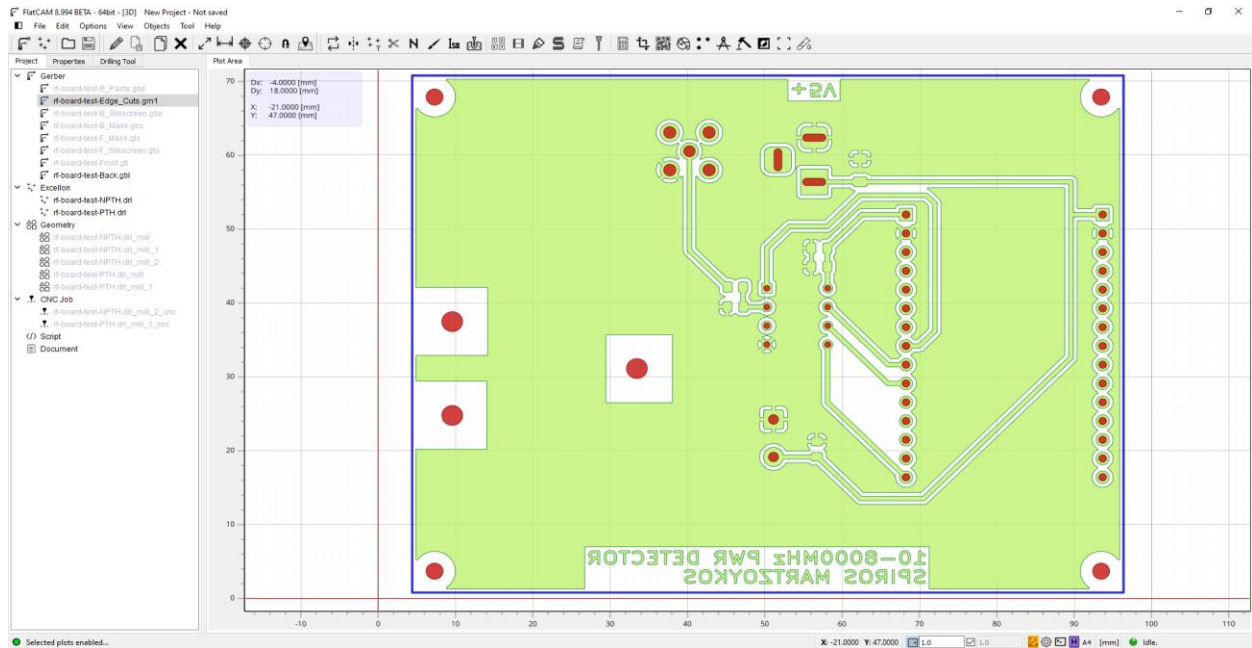
Εικόνα 74: Η καρτέλα CNCJob Object με τις τεχνικές παραμέτρους από όπου θα εξαχθεί το τελικό αρχείο G-Code που θα χρησιμοποιηθεί από τη μηχανή CNC WEGSTR για το φρεζάρισμα των οπών PTH.

Με την επιτυχή παραγωγή του αντικειμένου CNC Job Object (βλ. Εικόνα 74), απεικονίζεται με κόκκινο οι διαδρομές στην προεπισκόπηση για τις οπές, ολοκληρώνεται ο προγραμματισμός της κατεργασίας για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων στην πλακέτα.

- **Οπτική Επαλήθευση:** Στο κεντρικό παράθυρο προβολής, επιβεβαιώνεται ότι το λογισμικό έχει δημιουργήσει τις διαδρομές φρεζαρίσματος για το σύνολο των 45 οπών PTH. Οι διαδρομές αυτές ακολουθούν την περίμετρο κάθε οπής, διασφαλίζοντας την ακρίβεια των διαστάσεων παρά τη χρήση ενός μονού εργαλείου (0.7 mm).
- **Εκτίμηση Χρόνου και Απόστασης:** Όπως προκύπτει από την καρτέλα Properties, η συνολική απόσταση που θα διανύσει το εργαλείο (Travelled distance) είναι περίπου 565 mm, με έναν εκτιμώμενο χρόνο ολοκλήρωσης (Estimated time) τα 10 λεπτά. Τα στοιχεία αυτά είναι ωφέλιμα για τον προγραμματισμό της παραγωγής.
- **Τελική Εξαγωγή (G-Code):** Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει τη χρήση της εντολής Save CNC Code. Το παραγόμενο αρχείο περιέχει όλες τις απαραίτητες εντολές G-Code (ταχύτητες, βάθη και συντεταγμένες), έτοιμο προς μεταφόρτωση στο λογισμικό ελέγχου της μηχανής CNC Wegstr.

4.5.3.5 Αποκοπή Περιγράμματος της Πλακέτας (Board Cut- Out)

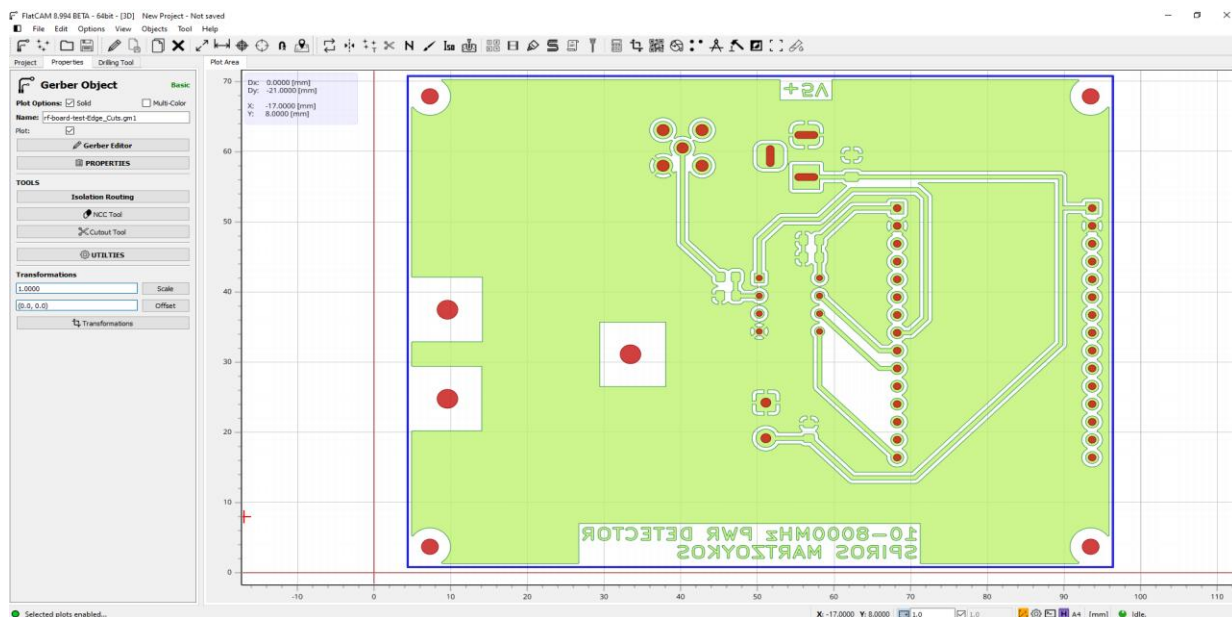
Για να κοπεί η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) στο επιθυμητό σχήμα και για να αφαιρεθεί από μια μεγαλύτερη πλακέτα, δημιουργείτε μια διαδρομή εργαλείου που ακολουθεί το περίγραμμα της πλακέτας.



Εικόνα 75: Επιλογή του αρχείου Gerber για την κοπή του περιγράμματος της πλακέτας από την καρτέλα Project.

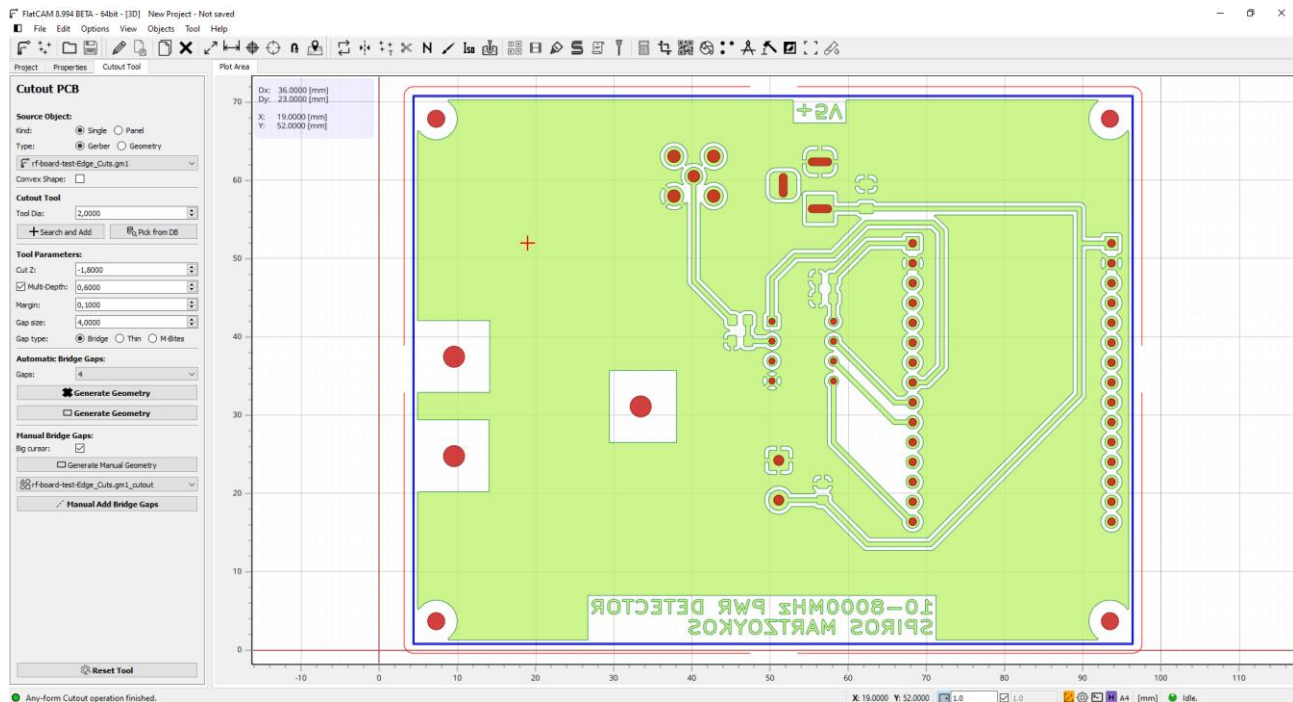
Το τελευταίο στάδιο της προετοιμασίας στο FlatCAM αφορά τη δημιουργία της διαδρομής για την εξωτερική κοπή της πλακέτας (βλ. Εικόνα 75). Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται το αρχείο τύπου Gerber με την κατάληξη .gm1 (Edge Cuts).

- Προεπισκόπηση: Στο παράθυρο Plot Area, το περίγραμμα εμφανίζεται ως μια μπλε γραμμή που περικλείει όλους τους διαδρόμους και τις οπές. Αυτή η οπτική επιβεβαίωση διασφαλίζει ότι το μέγεθος της πλακέτας είναι το επιθυμητό και ότι δεν υπάρχει επικάλυψη με τα εσωτερικά στοιχεία του κυκλώματος.
- Μετάβαση στο Cutout Tool: Με την επιλογή αυτού του αρχείου, ο χρήστης προχωρά στη χρήση του εργαλείου Cutout Tool, όπου θα οριστούν οι παράμετροι για το πάχος του κοπτικού, το βάθος κοπής και οι «γέφυρες» συγκράτησης (tabs).



Εικόνα 76: Η καρτέλα Gerber Object όπου μέσω της εντολής Cutout Tool θα δημιουργηθεί η γεωμετρία για την τελική κοπή του περιγράμματος της πλακέτας.

Με τη χρήση του Cutout Tool (βλ. Εικόνα 76), ορίστηκε το εξωτερικό ορθογώνιο περίγραμμα (μπλε γραμμή) για την τελική κοπή και απόσπαση της πλακέτας από το αρχικό υπόστρωμα FR4.

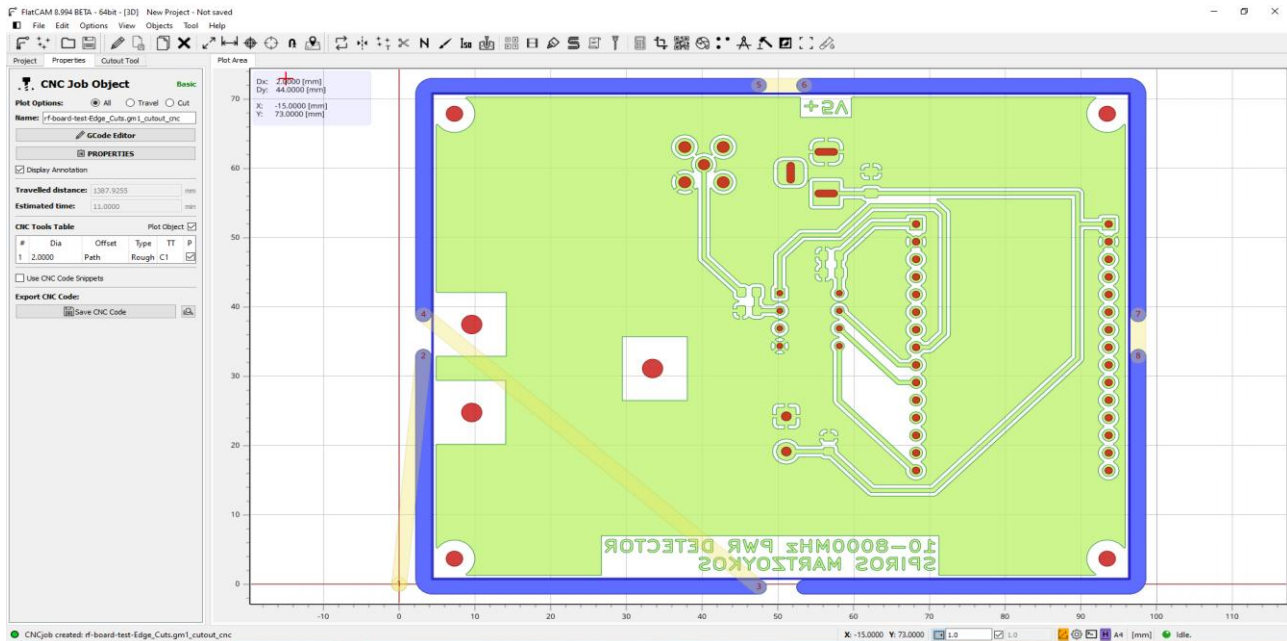


Εικόνα 77: Η καρτέλα με τις ρυθμίσεις του αντικειμένου προς αποκοπή.

Η τελευταία φάση της προετοιμασίας στο FlatCAM (βλ. Εικόνα 77) αφορά τον ορισμό των παραμέτρων για το τελικό κόψιμο της πλακέτας. Όπως φαίνεται στην καρτέλα Cutout Tool PCB, ορίστηκαν οι εξής ρυθμίσεις:

- **Εργαλείο Κοπής (Tool Diameter):** Χρησιμοποιήθηκε εργαλείο διαμέτρου 2.0 mm. Η διάμετρος αυτή επιλέχθηκε για να προσφέρει τη μέγιστη δυνατή σταθερότητα και ταχύτητα κατά τη διάρκεια της τελικής κοπής.
- **Βάθος Κοπής (Cut Z) και Multi-Depth:** Το τελικό βάθος ορίστηκε στα -1.8 mm, εξασφαλίζοντας την πλήρη διαμπερή κοπή του υλικού FR4 πάχους 1.6 mm. Για την προστασία του εργαλείου, χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία Multi-Depth με βήμα 0.6 mm ανά πέρασμα.
- **Γέφυρες Συγκράτησης (Gaps):** Για να αποφευχθεί η ανεξέλεγκτη κίνηση της πλακέτας κατά την ολοκλήρωση της κοπής, ορίστηκαν 4 γέφυρες συγκράτησης (Gaps: 4) με μέγεθος 4.0 mm η καθεμία. Αυτά τα «δεσμά» κρατούν την πλακέτα ενωμένη με το υπόλοιπο πάνελ, επιτρέποντας στον χρήστη να την αφαιρέσει χειροκίνητα με ασφάλεια στο τέλος της διαδικασίας.
- **Τύπος Γέφυρας (Gap type):** Επιλέχθηκε ο τύπος Bridge, ο οποίος δημιουργεί μια συμπαγή σύνδεση στο πλήρες πάχος του υλικού, προσφέροντας τη μέγιστη σταθερότητα.

Με την επιλογή Generate Geometry, το λογισμικό δημιουργεί το τελικό αντικείμενο γεωμετρίας που περιλαμβάνει την εξωτερική διαδρομή του εργαλείου μαζί με τα κενά για τις γέφυρες συγκράτησης.



Εικόνα 78: Η καρτέλα CNCJob Object με τις τεχνικές παραμέτρους από όπου θα εξαχθεί το τελικό αρχείο G-Code που θα χρησιμοποιηθεί από τη μηχανή CNC WEGSTR για την έναρξη της κοπής.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας Cutout PCB, δημιουργείται το τελικό αντικείμενο εργασίας CNC Job Object, το οποίο απεικονίζεται με έντονο μπλε χρώμα στην προεπισκόπηση (βλ. Εικόνα 78).

- **Επαλήθευση Γεφυρών Συγκράτησης (Gaps):** Στην εικόνα διακρίνονται καθαρά τα τέσσερα σημεία (Gaps) όπου η μπλε διαδρομή διακόπτεται. Αυτά τα κενά αντιστοιχούν στις γέφυρες που θα κρατήσουν την πλακέτα σταθερή πάνω στο πάνελ χαλκού μέχρι το τέλος της κατεργασίας, αποτρέποντας τη μετατόπισή της που θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφή του εργαλείου ή της πλακέτας.
- **Ανάλυση Διαδρομής Εργαλείου:** Η μπλε γραμμή αναπαριστά την πραγματική διαδρομή που θα ακολουθήσει το εργαλείο με διάμετρο 2.0 mm. Το λογισμικό έχει υπολογίσει αυτόματα την απαραίτητη μετατόπιση, ώστε οι τελικές εξωτερικές διαστάσεις της πλακέτας να συμπίπτουν ακριβώς με τον σχεδιασμό Gerber.
- **Εκτιμώμενος Χρόνος και Απόσταση:** Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα Properties, η συνολική διαδρομή που θα διανύσει το εργαλείο είναι περίπου 157 mm, με εκτιμώμενο χρόνο ολοκλήρωσης το 1 λεπτό.
- **Τελική Εξαγωγή:** Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επιλογή Save CNC Code, παράγοντας το αρχείο G-Code που περιλαμβάνει όλες τις κινήσεις, τις ταχύτητες και τα πολλαπλά περάσματα (Multi-Depth) που ορίστηκαν προηγουμένως.

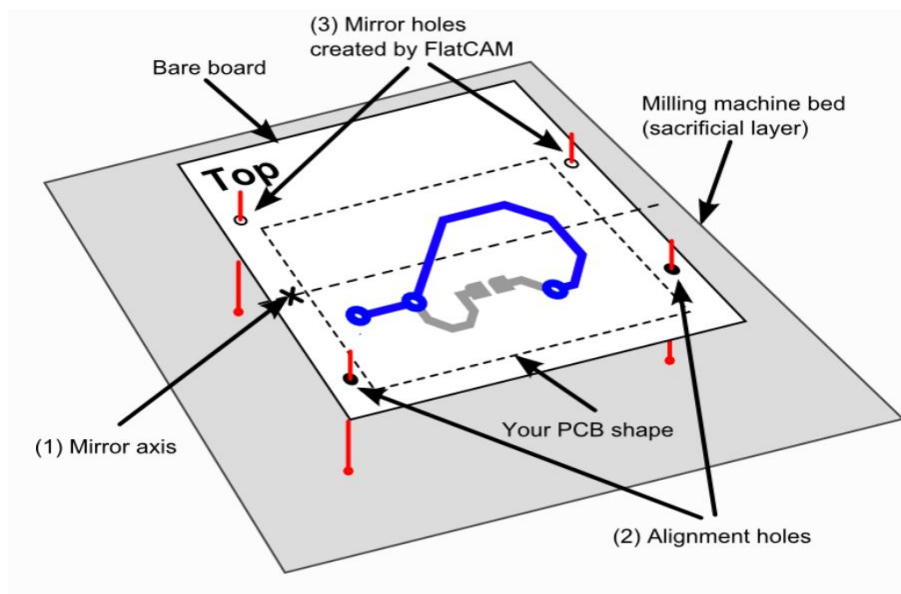
Η διαδικασία παραγωγής της πλακέτας μονής όψευς ολοκληρώθηκε με επιτυχία μέσω της χρήσης του λογισμικού FlatCAM, το οποίο αποτέλεσε τον κρίσιμο συνδετικό κρίκο μεταξύ του ηλεκτρονικού σχεδιασμού (CAD) και της μηχανικής κατεργασίας (CAM).

Μέσα από τη ρύθμιση των παραμέτρων απομόνωσης (Isolation Routing) και τη δημιουργία διαδρομών κοπής (Board Cutout), κατέστη δυνατή η κατασκευή ενός πρωτοτύπου με υψηλή ακρίβεια, αποφεύγοντας τη χρήση χημικών μεθόδων αποχάλκωσης που είναι χρονοβόρες και επιβλαβείς για το περιβάλλον. Η δυνατότητα λεπτομερούς ελέγχου παραμέτρων, όπως η διάμετρος του εργαλείου και ο αριθμός των περασμάτων, επέτρεψε τη διασφάλιση της ακεραιότητας των διαδρομών σήματος. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή αποδείχθηκε εξαιρετικά αποδοτική για την ταχεία πρωτοτυποποίηση προσφέροντας την απαραίτητη επαναληψιμότητα και ακρίβεια που απαιτείται για την εργαστηριακή επαλήθευση του κυκλώματος.

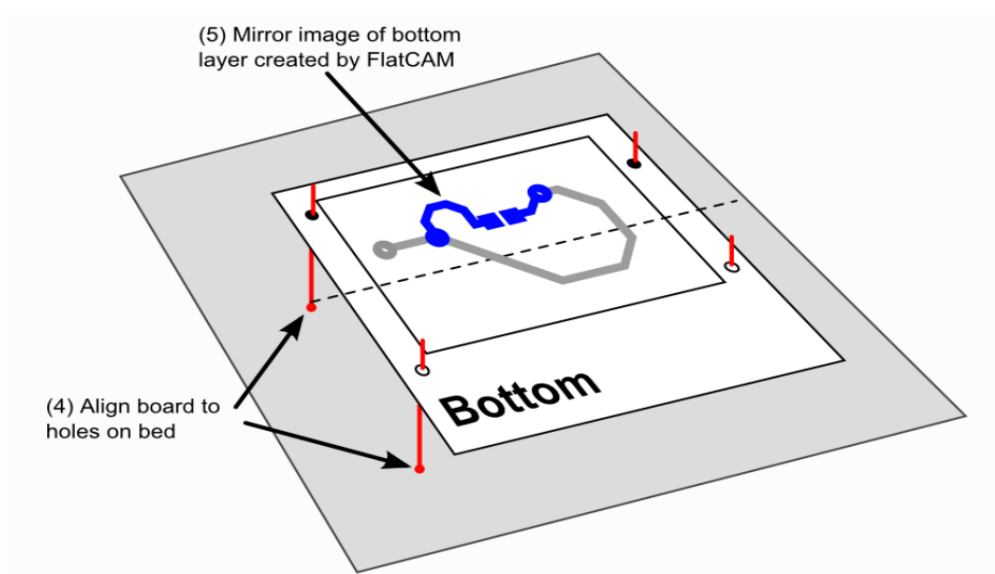
4.5.4. Προετοιμασία Εργασιών CNC για την Κατασκευή Διπλής Όψεως Πλακέτας με το Πρόγραμμα FlatCAM

Η κύρια ιδέα πίσω από αυτή τη διαδικασία είναι να διασφαλιστεί ότι όταν γυρίζει η πλακέτα για να φρεζαριστεί η κάτω πλευρά της, αυτή θα είναι τέλεια ευθυγραμμισμένη με την πάνω πλευρά.

Η μηχανική ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας οπές/πείρους ευθυγράμμισης (βλ. Εικόνα 79). Αυτές είναι οπές στην πλακέτα και στην πλατφόρμα της φρέζας. Οι πείροι χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση των οπών στην πλακέτα με τις οπές στο θυσιαστικό στρώμα. Οι οπές είναι πάντα ζεύγη οπών που είναι συμμετρικές γύρω από έναν άξονα κατοπτρισμού. Έτσι εξασφαλίζεται ότι όταν γυρίζει η πλακέτα, η πλακέτα ευθυγραμμίζεται χρησιμοποιώντας τις ίδιες οπές ευθυγράμμισης όπως πριν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 80.

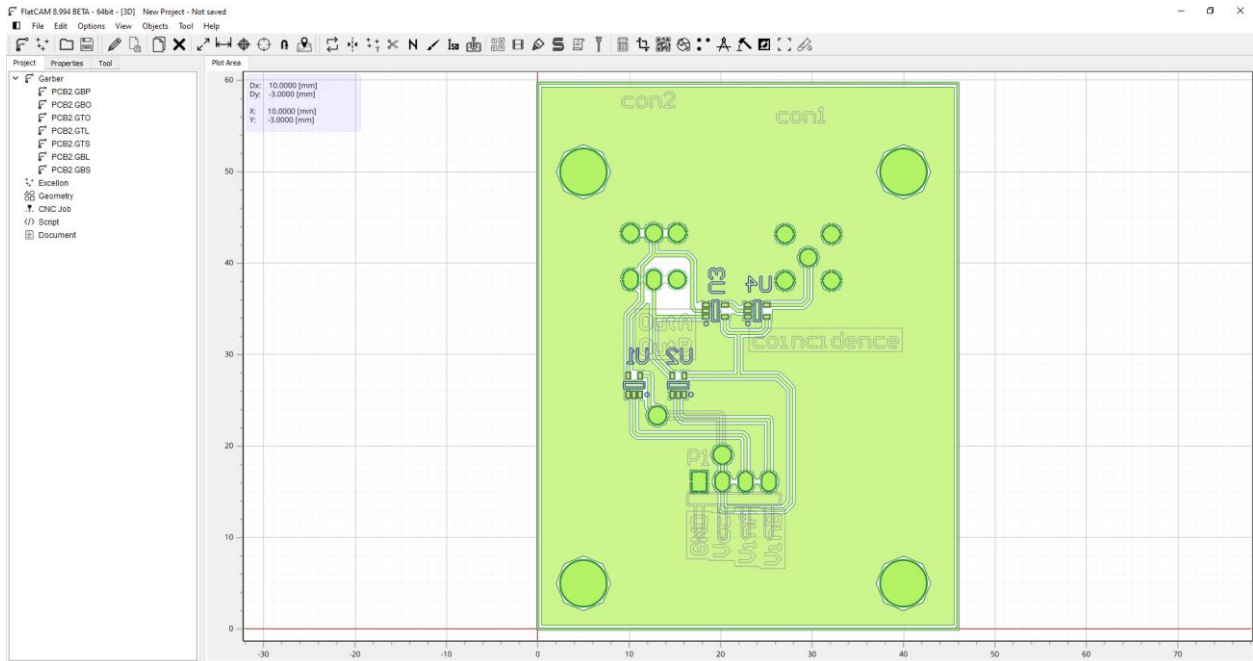


Εικόνα 79: Τοποθέτηση του άξονα κατοπτρισμού στην πάνω πλευρά της πλακέτας.



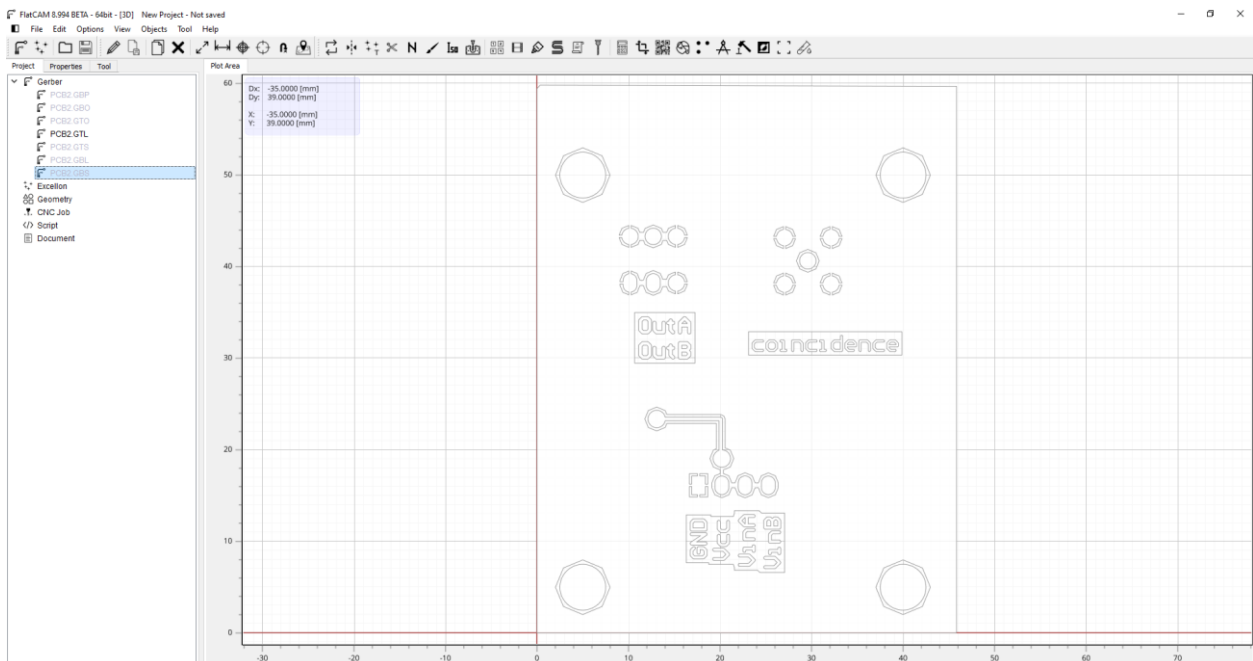
Εικόνα 80: Η κάτω πλευρά της πλακέτας κατοπτρισμένη γύρω από τον ίδιο άξονα που χρησιμοποιήθηκε για τις οπές ευθυγράμμισης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία φρεζαρίσματος των οπών και της τελικής κοπής του περιγράμματος παραμένει ταυτόσημη τόσο στις πλακέτες μονής όσο και στις πλακέτες διπλής όψεως. Παρά την αύξηση της πολυπλοκότητας στον σχεδιασμό των διαδρομών χαλκού, οι μηχανικές παράμετροι κατεργασίας του υποστρώματος και η αλληλουχία των βημάτων στο λογισμικό FlatCAM δεν διαφοροποιούνται.



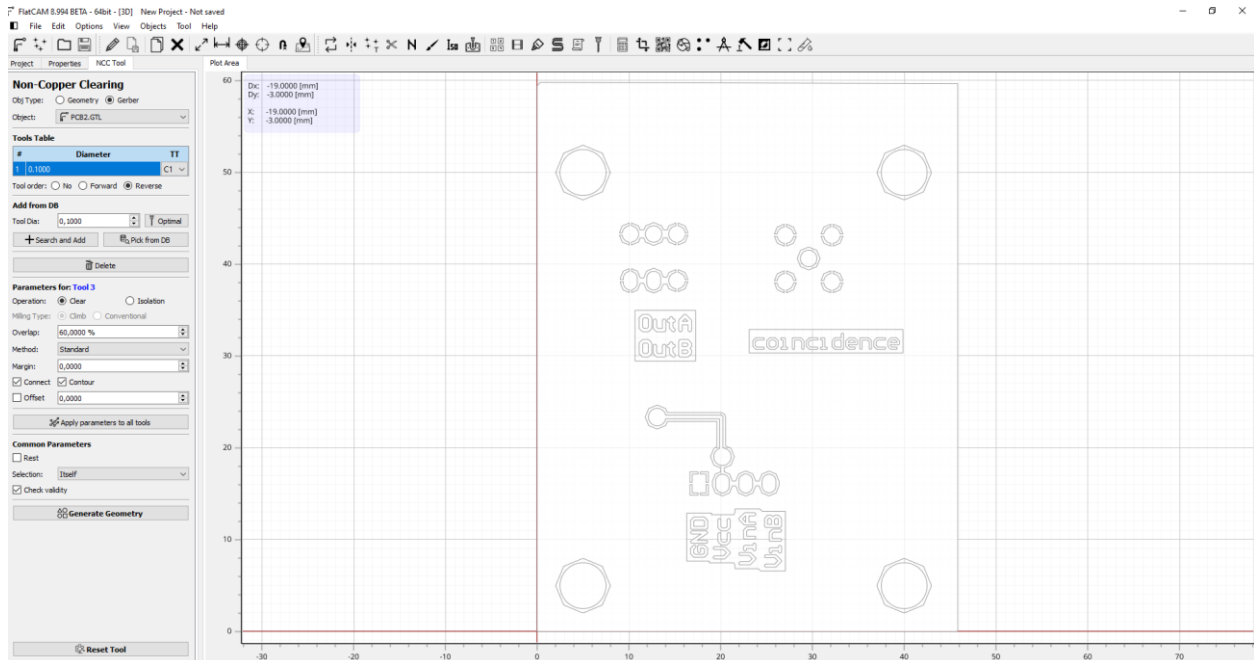
Εικόνα 81: Στο νέο project εισάγονται τα αρχεία Gerber για το Top και Bottom Layer, τα αρχεία Excellon για τις οπές καθώς και το αρχείο για την κοπή του περιγράμματος της πλακέτας.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 81, φορτώθηκαν τα επίπεδα της επάνω όψεως χαλκού (PCB2.GTL) και της κάτω όψεως χαλκού (PCB2.GBL), μαζί με τις αντίστοιχες μάσκες και μεταξοτυπίες.



Εικόνα 82: Επιλογή του αρχείου Gerber της επάνω πλευράς (Top Layer).

Βάσει της απεικόνισης στην Εικόνα 82 επιλέχθηκε το αρχείο Gerber της επάνω πλευράς χαλκού (PCB2.GTL). Η ενέργεια αυτή επιτρέπει την απομόνωση και τον οπτικό έλεγχο των αγωγίμων διαδρομών που θα χαραχθούν στην άνω επιφάνεια της διπλής όψεως πλακέτας.



Εικόνα 83: Ορισμός των παραμέτρων στην καρτέλα Non-Copper.

Επιλέγοντας από το μενού Tool το εργαλείο Non-Copper Clearing για την αφαίρεση του περιττού χαλκού από τις περιοχές που δεν υπάρχουν αγωγίμοι διάδρομοι εμφανίζεται η παραπάνω καρτέλα (βλ. Εικόνα 83). Πέρα από την απλή απομόνωση των διαδρόμων (Isolation Routing), χρησιμοποιείται η λειτουργία Non-Copper Clearing για τον πλήρη καθαρισμό των περιοχών της πλακέτας όπου δεν απαιτείται η παρουσία χαλκού. Σκοπός της διαδικασίας είναι:

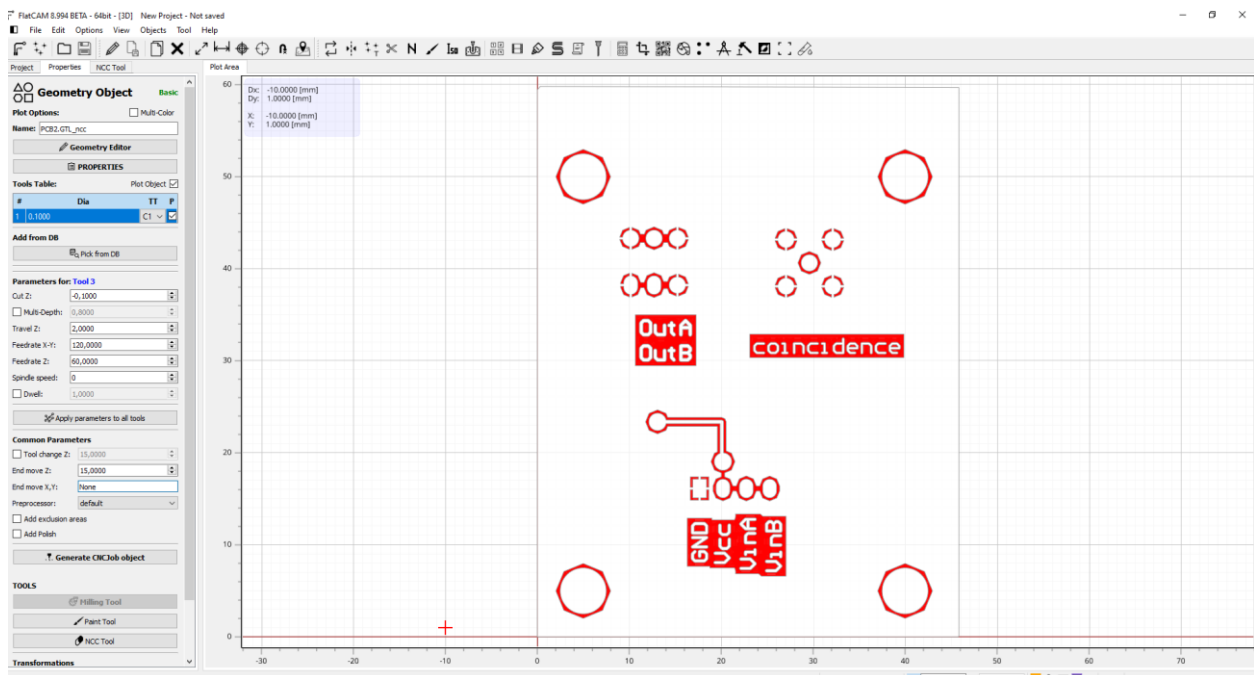
- Η πλήρης αφαίρεση του χαλκού από τις κενές περιοχές.
- Να μειωθεί η πιθανότητα βραχυκυκλωμάτων λόγω υπολειμμάτων μετάλλου.
- Διευκολύνεται η συγκόλληση των εξαρτημάτων και προσφέρεται ένα πιο καθαρό και επαγγελματικό αισθητικό αποτέλεσμα.

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, ορίστηκε ένα εργαλείο διαμέτρου 0.1 mm. Η πολύ μικρή αυτή διάμετρος επιτρέπει στο εργαλείο να εισχωρήσει σε στενά σημεία ανάμεσα σε pads και διαδρόμους, εξασφαλίζοντας τον μέγιστο δυνατό καθαρισμό.

Παράμετροι Κατεργασίας:

- Overlap (60%): Ορίστηκε υψηλό ποσοστό επικάλυψης των περασμάτων για να διασφαλιστεί ότι δεν θα μείνουν «νησίδες» χαλκού ανάμεσα στις διαδρομές του εργαλείου.
- Method (Standard): Χρησιμοποιήθηκε η τυπική μέθοδος σάρωσης της περιοχής για την ομοιόμορφη αφαίρεση του υλικού.

Με την εντολή Generate Geometry, το FlatCAM υπολογίζει όλες τις περιοχές που πρέπει να εκκενωθούν και δημιουργεί τις αντίστοιχες διαδρομές, οι οποίες στη συνέχεια θα μετατραπούν σε G-Code με τις κατάλληλες παραμέτρους βάθους (Cut Z). Επιλέγοντας Generate Geometry το FlatCAM αντιπροσωπεύει με κόκκινο χρώμα τις διαδρομές που θα ακολουθήσει η φρέζα.



Εικόνα 84: Η καρτέλα Geometry Object για ορισμό της γεωμετρίας στον τρισδιάστατο χώρο.

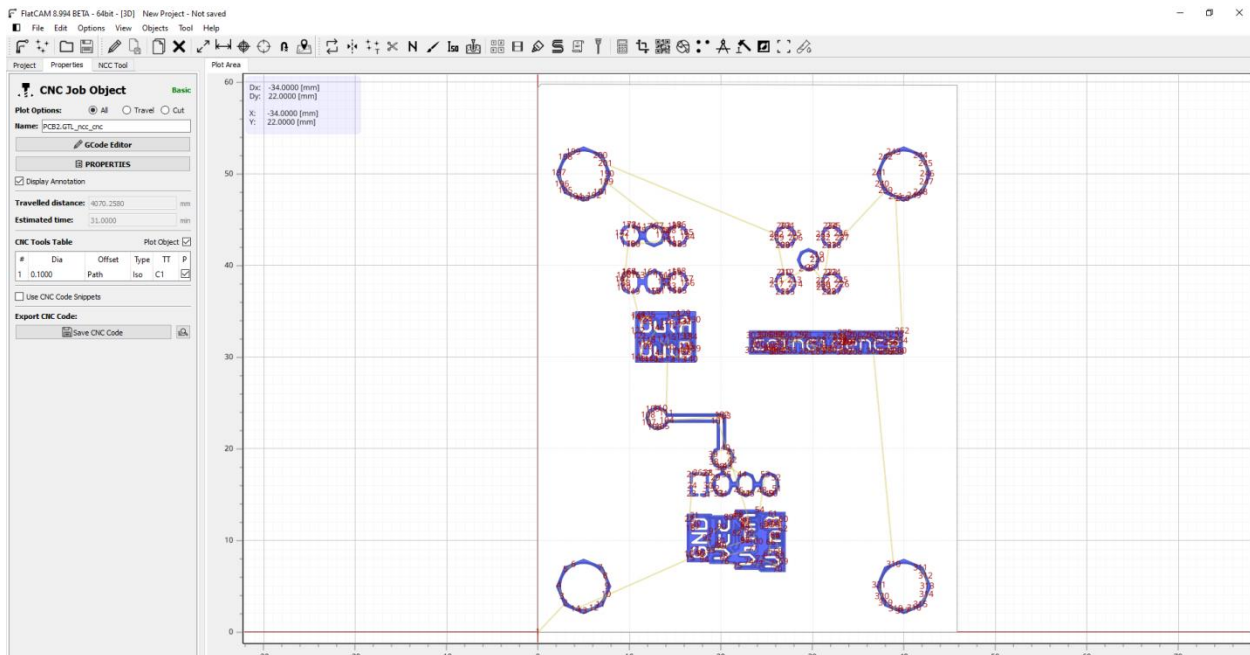
Όπως φαίνεται στο στιγμιότυπο της Εικόνας 84 καθορίζονται οι παράμετροι κίνησης του εργαλείου στην καρτέλα Geometry Object. Οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν είναι:

- Εργαλείο διαμέτρου 0.1 mm, το οποίο επιτρέπει τη χάραξη με μεγάλη λεπτομέρεια, ακόμα και στα εσωτερικά κενά των γραμμών.
- Το βάθος Κοπής (Cut Z), ορίστηκε στα -0.1 mm. Αυτό το βάθος είναι επαρκές για την πλήρη αφαίρεση της στρώσης του χαλκού χωρίς να εισχωρεί βαθιά στο υπόστρωμα FR4, προστατεύοντας έτσι τη λεπτή μύτη του εργαλείου.
- Το ύψος μετακίνησης (Travel Z), διατηρήθηκε στα 2.0 mm για απόλυτη ασφάλεια κατά τις γρήγορες μετακινήσεις του εργαλείου πάνω από την πλακέτα.
- Ο ορισμός της ταχύτητας της ατράκτου, Spindle speed στο μηδέν σημαίνει ότι ο έλεγχος των στροφών γίνεται χειροκίνητα στη μηχανή CNC και όχι μέσω του G-code.

Δεν πραγματοποιήθηκε αλλαγή στις παραμέτρους κίνησης, αφήνοντας τις ταχύτητες Feedrate XY και Feedrate Z στις τιμές 120 mm/min και 60 mm/min αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν σταθερή κοπή χωρίς τον κίνδυνο θραύσης του πολύ λεπτού εργαλείου των 0.1 mm. Επιπλέον, οι παράμετροι τερματισμού της κίνησης διατηρήθηκαν στις αρχικές τους ρυθμίσεις, με το End move Z στα 15 mm και το End move X,Y στην επιλογή None. Αυτό σημαίνει πως μόλις το CNC τελειώσει το φρεζάρισμα, η κεφαλή θα ανέβει σε ένα ασφαλές ύψος 15 χιλιοστών, αλλά δεν θα μετακινηθεί σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο, π.χ. στην αρχή των αξόνων, οπότε θα σταματήσει πάνω από το τελευταίο σημείο κοπής.

Στην προεπισκόπηση (Plot Area), οι κόκκινες διαδρομές υποδεικνύουν ακριβώς πού θα κινηθεί το εργαλείο για να αφαιρέσει τον χαλκό, περιλαμβάνοντας τις οπές στήριξης, τα pads των εξαρτημάτων και τις ενημερωτικές ενδείξεις της πλακέτας.

Επιλέγοντας Generate CNCJob Object δημιουργείται με μπλε χρώμα το πρόγραμμα CNC που θα ακολουθήσει η εργαλειομηχανή. Υποδεικνύεται επίσης μια εκτίμηση του χρόνου δρομολόγησης και διάτρησης μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία κατασκευής της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB).



Εικόνα 85: Το αντικείμενο CNCJob Object πριν την μετατροπή του σε εντολές G-Code για φρεζάρισμα της πάνω πλευράς της πλακέτας από την μηχανή CNC WEGSTR.

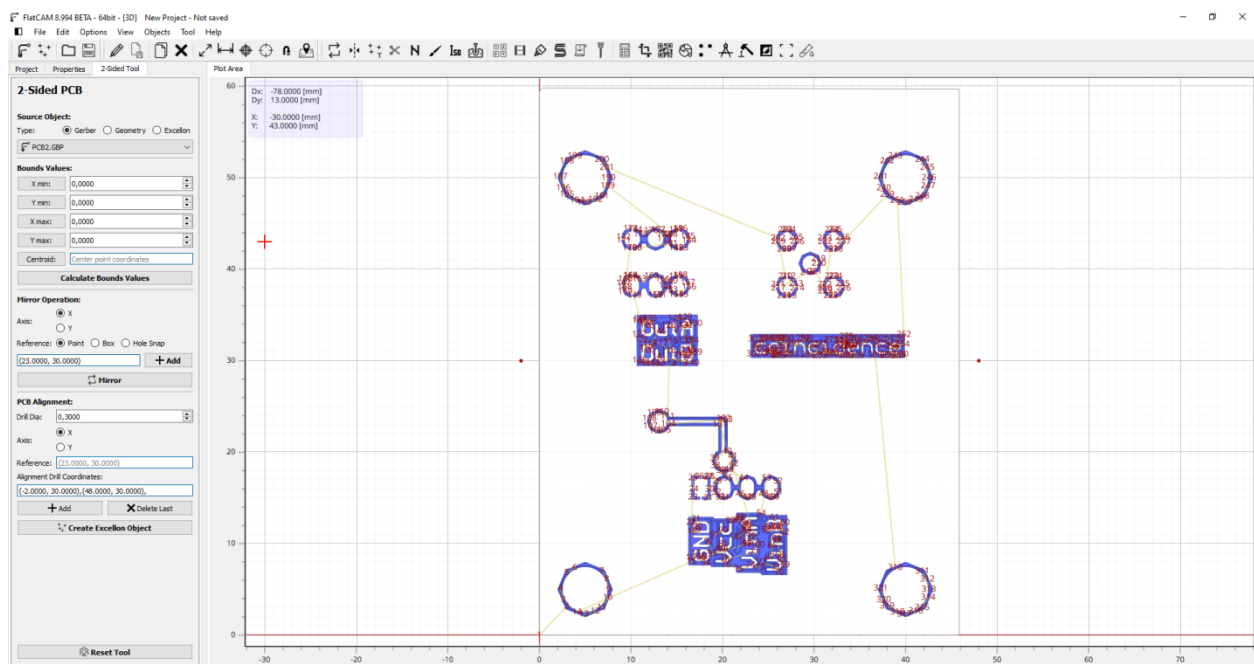
Με την επιλογή Generate CNCJob Object, οι γεωμετρικές διαδρομές καθαρισμού μετατρέπονται σε συγκεκριμένες εντολές κίνησης. Στην τελική αυτή προεπισκόπηση (βλ. Εικόνα 85), επιβεβαιώνονται τα εξής:

- **Οπτική Επαλήθευση:** Οι μπλε περιοχές στην προεπισκόπηση δείχνουν το «γέμισμα» της διαδρομής του εργαλείου. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι το εργαλείο των 0.1 mm θα σαρώσει την επιφάνεια γύρω από τα κείμενα και τα pads, διασφαλίζοντας ότι δεν θα παραμείνει καθόλου πλεονάζων χαλκός σε αυτά τα κρίσιμα σημεία.
- **Ανάλυση Κατεργασίας:** Στο αριστερό μενού Properties, το FlatCAM παρέχει τα τελικά δεδομένα. Η συνολική απόσταση που θα διανύσει το εργαλείο, Travelled distance είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε αυτή τη φάση, λόγω της πυκνής σάρωσης που απαιτεί ο καθαρισμός της επιφάνειας.
- **Εξαγωγή G-Code:** Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το πάτημα του κουμπιού Save CNC Code. Το αρχείο που δημιουργείται περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες για τις ταχύτητες και τα βάθη που ορίστηκαν, επιτρέποντας στη μηχανή CNC Wegstr να εκτελέσει τον καθαρισμό με ακρίβεια δευτερολέπτου.

Στο ψηφιακό περιβάλλον (Plot Area) απεικονίζονται με κίτρινο χρώμα οι διαδρομές Travel, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις κινήσεις του εργαλείου στον αέρα, πάνω από το ύψος ασφαλείας Travel Z. Αυτές οι γραμμές οπτικοποιούν τη βέλτιστη διαδρομή που υπολόγισε το λογισμικό για τη μετάβαση από τη μία οπή στην επόμενη, εξασφαλίζοντας τη συντομότερη δυνατή διάρκεια της διαδικασίας διάτρησης.

Για την ευθυγράμμιση της κάτω επιφάνειας με την πάνω επιφάνεια όταν αναποδογυριστεί η πλακέτα, θα δημιουργηθεί ένα πλαίσιο που θα αποτελείται από οπές που θα είναι συμμετρικές γύρω από έναν άξονα. Η τοποθέτηση του άξονα κατοπτρισμού μπορεί να είναι εντελώς αυθαίρετη. Απλώς μετά την αναστροφή της πλακέτας, θα εξακολουθεί να ταιριάζει στην πλατφόρμα της φρέζας. Το ίδιο ισχύει και για τις οπές ευθυγράμμισης. Δεν έχει μεγάλη σημασία πού τοποθετούνται. Για να διασφαλιστεί η συμμετρία των οπών ευθυγράμμισης, καθορίζονται οι οπές μόνο στη μία πλευρά του άξονα του κατοπτρισμού και το FlatCAM αναλαμβάνει να δημιουργήσει αντίγραφα κατοπτρισμού.

Επιλέγοντας το εργαλείο 2-Sided PCB από το μενού Tool ορίζονται το αντικείμενο προς κατοπτρισμό (Source Object), ο άξονας συμμετρίας (Axis), η προέλευσης της συμμετρίας, δηλαδή το σημείο αναφοράς της πλακέτας (Point coordinates). Ένα μόνο σημείο καθορίζει πού βρίσκεται ο άξονας, οι συντεταγμένες του σημείου καθορίζονται με τη μορφή (x, y). Ορίζονται ακόμη η διάμετρος του τρυπανιού (Drill Dia) για τις οπές ευθυγράμμισης. Η εισαγωγή των συντεταγμένων των σημείων για τις οπές ευθυγράμμισης (Drill coordinates) γίνεται με την μορφή (x1, y1), (x2, y2). Οι οπές αυτές πρέπει να τοποθετούνται έξω από το περίγραμμα της πλακέτας. Οι συντεταγμένες δεν πληκτρολογούνται χειροκίνητα αλλά κάνοντας κλικ στο γράφημα αντιγράφονται αυτόματα σε μορφή (x, y) στο πλαίσιο εισαγωγής. Αυτές οι οπές θα ανοιχτούν και στο θυσιαστικό στρώμα του CNC WEGSTR. Επιλέγοντας Create Excellon Object, εμφανίζεται το νέο αντικείμενο Excellon στην καρτέλα Project.



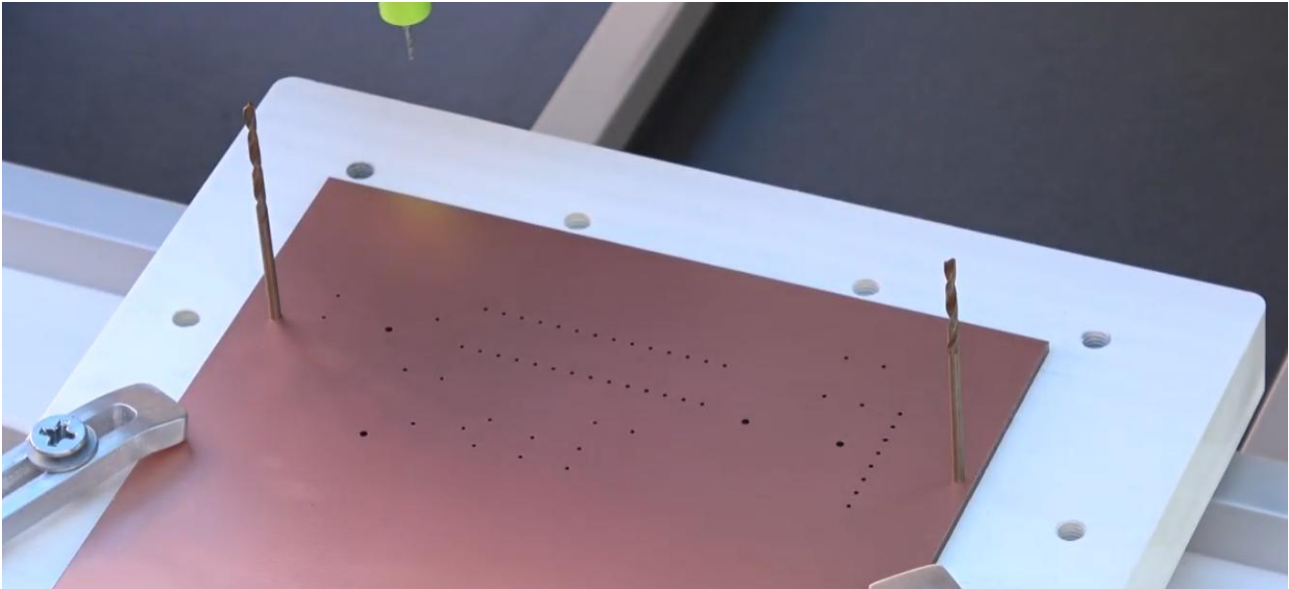
Εικόνα 86: Η καρτέλα 2-Sided PCB για υπόδειξη του άξονα συμμετρίας, του κέντρου συμμετρίας και των οπών ευθυγράμμισης.

Βάσει της απεικόνισης στην Εικόνα 86 για την περίπτωση κατασκευής πλακέτας διπλής όψης, η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η ακριβής σύμπτωση των διαδρομών της επάνω πλευράς με αυτές της κάτω. Για την επίτευξη αυτής της ακρίβειας, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2-Sided PCB του FlatCAM, το οποίο βοηθά στην ευθυγράμμιση της επάνω και της κάτω πλευράς μιας πλακέτας δύο όψεων. Προκειμένου να κατεργαστεί η κάτω πλευρά (Bottom Layer), το σχέδιο πρέπει να «κατοπτριστεί».

- Επιλέχθηκε ο αντικατοπτρισμός ως προς τον άξονα X (Axis: X). Αυτό σημαίνει ότι η πλακέτα θα «τουμπάρει» πάνω από τον οριζόντιο άξονα (σαν να γυρίζει σελίδα σε ημερολόγιο τοίχου).
- Ως σημείο αναφοράς (Point Reference) χρησιμοποιήθηκε το κέντρο του πλαισίου της πλακέτας, διασφαλίζοντας ότι η γεωμετρία θα παραμείνει συμμετρική ως προς το φυσικό της μέσο.
- Για τον φυσικό προσδιορισμό της θέσης της πλακέτας πάνω στη μηχανή CNC, δημιουργήθηκαν ειδικές οπές ευθυγράμμισης (Alignment Drills).
- Ορίστηκε η διάμετρος τρυπανιού (Drill Dia) 0.3 mm.

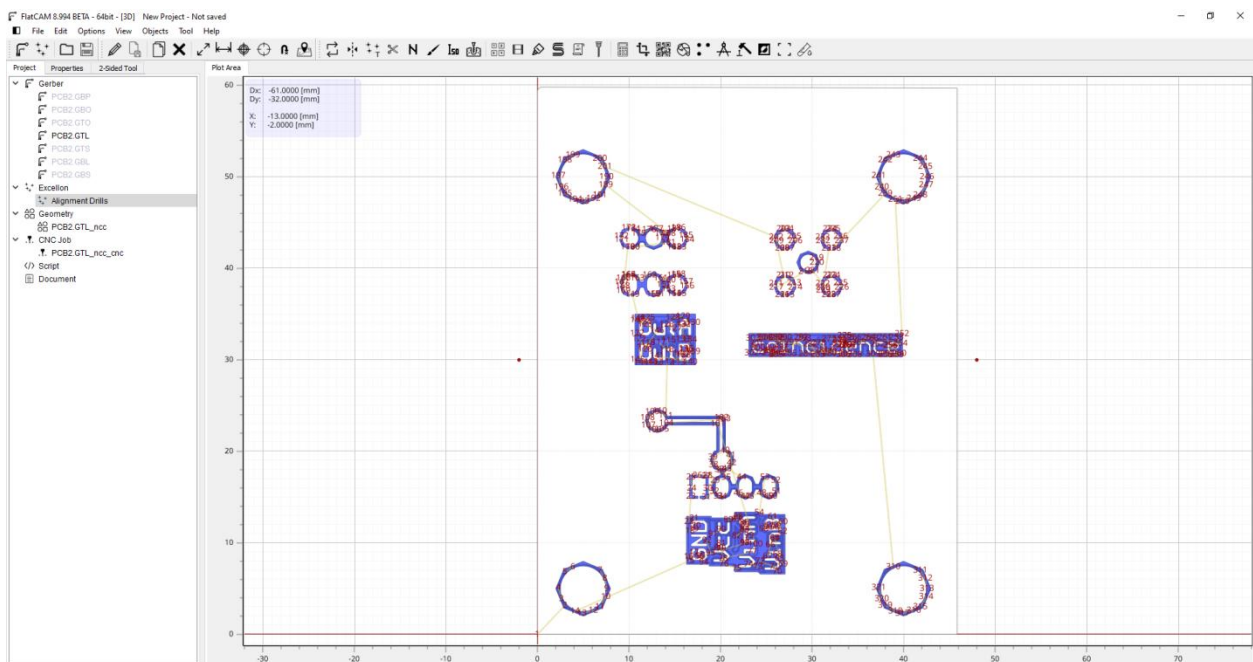
Επιλέχθηκαν συγκεκριμένες συντεταγμένες (Alignment Drill Coordinates) για τη διάνοιξη οπών στην πλακέτα και στην πλατφόρμα της φρέζας. Αυτές οι οπές επιτρέπουν στον χρήστη να αναστρέ

ψει την πλακέτα και να την επανατοποθετήσει στη μηχανή χρησιμοποιώντας πείρους (pins), εξασφαλίζοντας ότι η κάτω όψη θα είναι τέλεια ευθυγραμμισμένη με τις οπές και τους διαδρόμους της επάνω όψης. Στην εικόνα φαίνεται ο ορισμός των δύο σημείων που έχουν προστεθεί. Alignment Drill Coordinates, το ένα σημείο έχει συντεταγμένες (-2.0000, 30.0000) και το άλλο (48.0000, 30.0000).



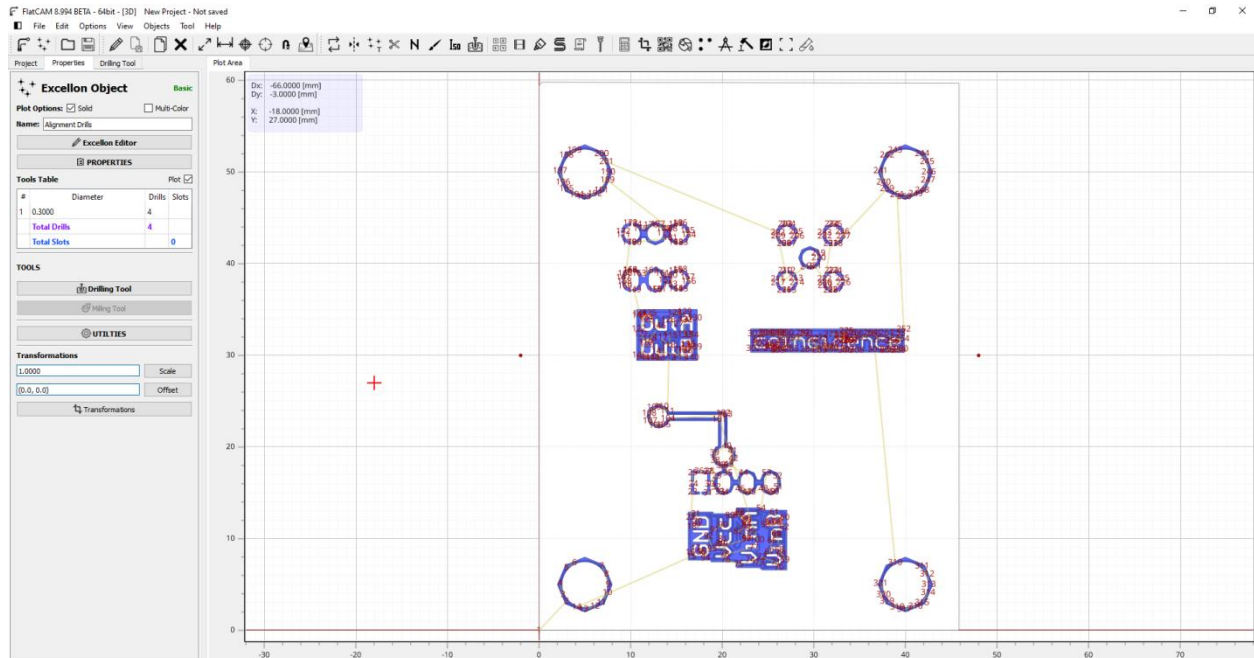
Εικόνα 87: Υλοποίηση οπών ευθυγράμμισης (PCB Alignment Holes) για την ακριβή αμφίπλευρη κατεργασία με τη μηχανή CNC Wegstr.

Για την επιτυχή υλοποίηση της πλακέτας διπλής όψεως στη φρέζα CNC Wegstr, η φυσική ευθυγράμμιση του υποστρώματος FR4 είναι καθοριστικής σημασίας. Όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 87, η διαδικασία βασίζεται στη χρήση πείρων αναφοράς που δημιουργήθηκαν μέσω του **Double-Sided PCB Tool** του FlatCAM.



Εικόνα 88: Επιλογή του νέου αντικειμένου Excellon για τις οπές ευθυγράμμισης από την καρτέλα Project.

Στο δέντρο έργου (Project Tree) στα αριστερά της Εικόνας 88, διακρίνονται τα παραχθέντα αρχεία, συμπεριλαμβανομένου του αντικειμένου Alignment Drills για τις οπές ευθυγράμμισης, καθώς και του CNC Job που περιέχει τον τελικό G-Code προς εξαγωγή στο μηχάνημα CNC Wegstr.

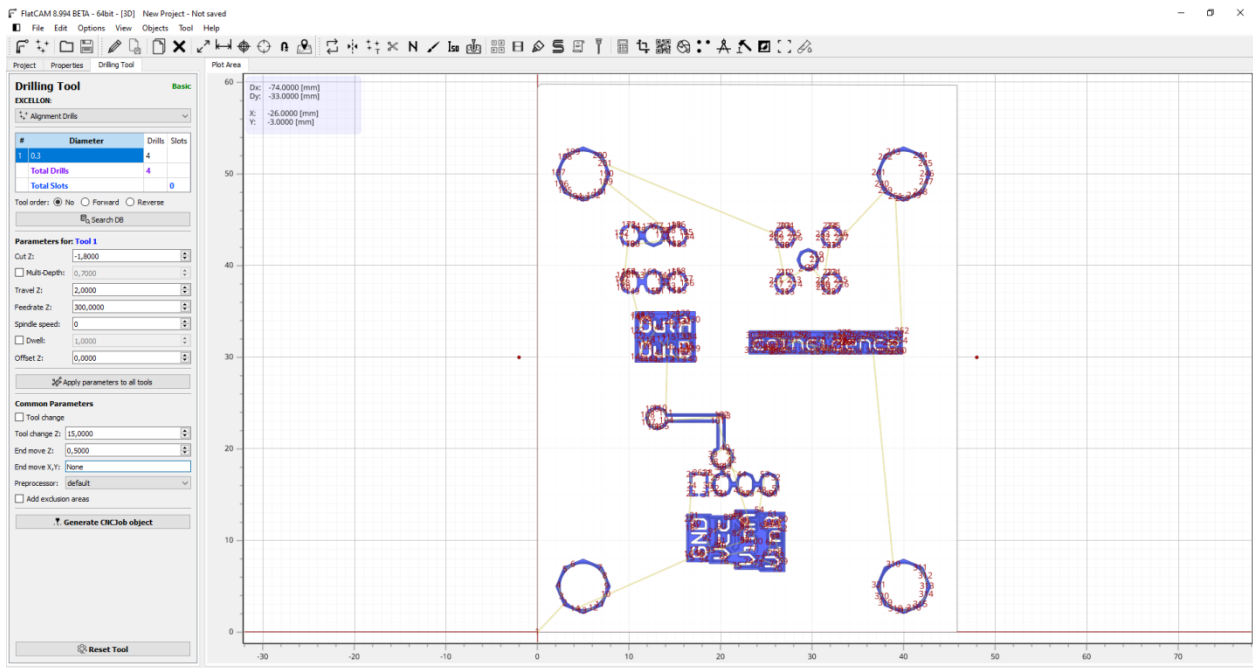


Εικόνα 89: Επιλογή του Drilling Tool από την καρτέλα Excellon Object.

Επιλέγοντας το νέο αντικείμενο Alignment Drills στην καρτέλα Project, ανοίγει η νέα καρτέλα όπως φαίνεται στην Εικόνα 89, όπου ορίζονται οι τεχνικές λεπτομέρειες:

- Επιβεβαιώνεται η χρήση ενός τρυπανιού διαμέτρου 0.3 mm, όπως ορίστηκε στο προηγούμενο στάδιο. Ο πίνακας δείχνει ότι υπάρχουν συνολικά 4 οπές (Total Drills: 4), οι οποίες είναι τοποθετημένες συμμετρικά περιμετρικά της πλακέτας. Οι οπές είναι τέσσερις επειδή το FlatCAM, όταν χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2-Sided PCB, δημιούργησε αυτόματα ζεύγη οπών για λόγους συμμετρίας. Το πρόγραμμα δημιούργησε αυτά τα δύο σημεία, αλλά πρόσθεσε αυτόματα και τα είδωλά τους στην απέναντι πλευρά του άξονα που επιλέχθηκε. Αυτό γίνεται για να υπάρχει η ευελιξία να τοποθετηθούν οι πείροι σε όποιο ζευγάρι βολεύει κατά το αναποδογύρισμα της πλακέτας. Στην πράξη όμως, όπως φαίνεται και στην (Εικόνα 87) από το CNC, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δύο οπές που ήταν απαραίτητες για να στερεωθεί η πλακέτα.
- Στα εργαλεία κατεργασίας (Tools), ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν θα χρησιμοποιήσει το Drilling Tool, για απλό τρύπημα ή το Milling Tool, για φρεζάρισμα. Δεδομένου ότι η διάμετρος είναι πολύ μικρή (0.3 mm), συνήθως προκρίνεται η λύση της απλής διάτρησης.
- Η τιμή του Scale διατηρήθηκε στη μονάδα (1.0), δηλαδή καμία μεγέθυνση ή σμίκρυνση και η μετατόπιση Offset στο μηδέν, διασφαλίζοντας ότι οι οπές ευθυγράμμισης παραμένουν σε απόλυτη ταύτιση με τις αρχικές συντεταγμένες σχεδιασμού.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε η λειτουργία Drilling Tool από την ενότητα Tools, προκειμένου να γίνει η μετάβαση στην αντίστοιχη καρτέλα ρυθμίσεων για τον καθορισμό των παραμέτρων διάτρησης των οπών ευθυγράμμισης.

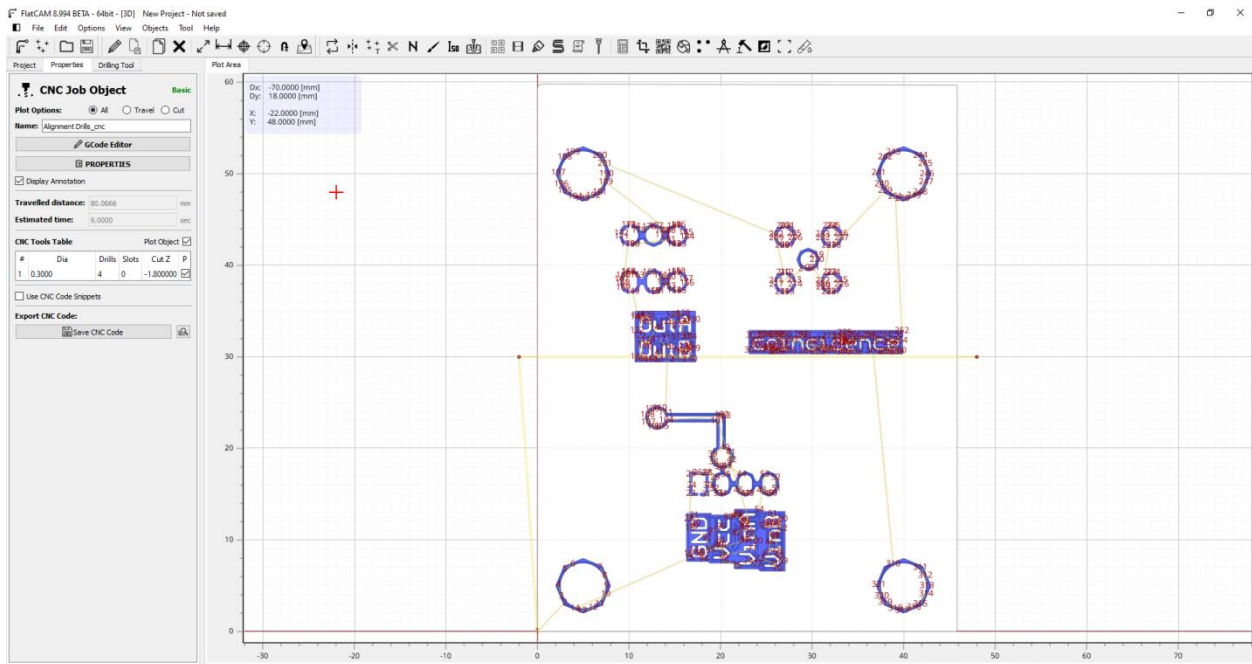


Εικόνα 90: Παραμετροποίηση του εργαλείου διάτρησης (Drilling Tool) για τις οπές ευθυγράμμισης.

Στην καρτέλα Drilling Tool της Εικόνα 90, καθορίζονται οι λεπτομέρειες της κατεργασίας για τις οπές αναφοράς. Οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν, όπως φαίνονται στην παραπάνω εικόνα είναι οι εξής:

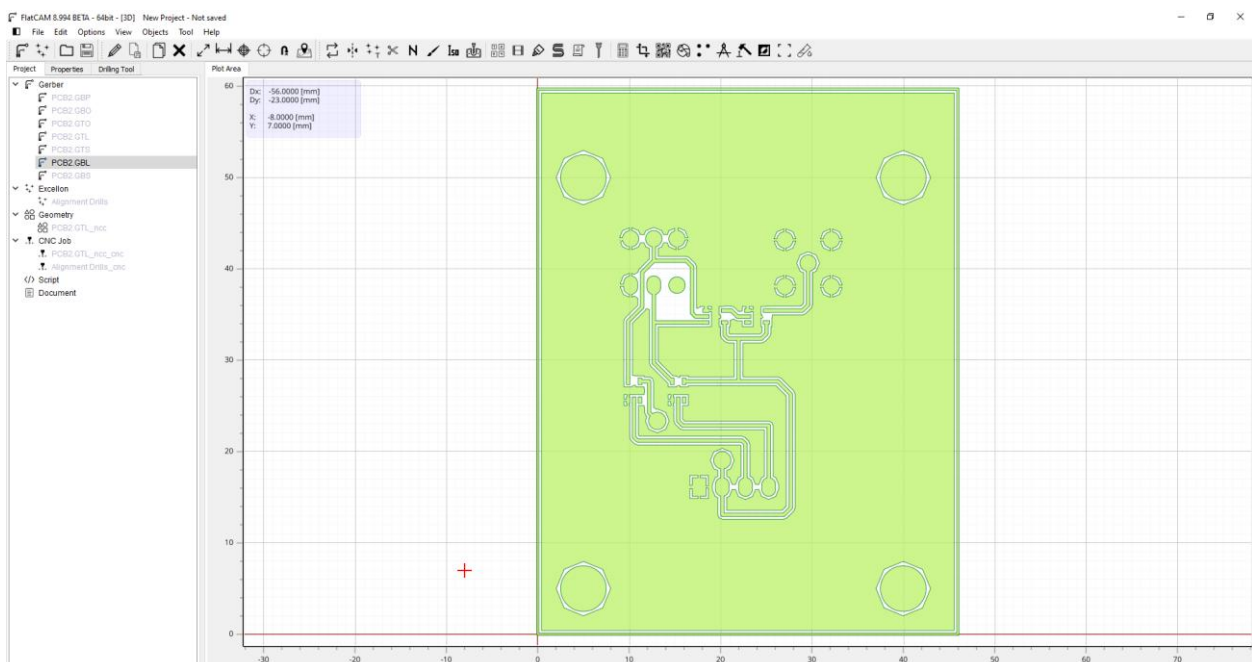
- Επιβεβαιώνεται η χρήση του τρυπανιού διαμέτρου 0.3 mm. Ο πίνακας Tools Table δείχνει ότι θα πραγματοποιηθούν συνολικά 4 οπές (Total Drills: 4).
- Το βάθος διάτρησης (Cut Z), ρυθμίστηκε στα -1.8 mm. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ώστε το τρυπάνι να διαπεράσει πλήρως την πλακέτα 1.6 mm και να εισχωρήσει ελαφρώς στην πλατφόρμα της φρέζας, δημιουργώντας την υποδοχή για τους πείρους ευθυγράμμισης.
- Όσον αφορά την ταχύτητα βύθισης (Feedrate Z) και το ύψος ασφαλείας (Travel Z), διατηρήθηκαν οι προκαθορισμένες τιμές του λογισμικού στα 300 mm/min και 2.0 mm αντίστοιχα, καθώς κρίθηκαν επαρκείς για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης διάτρησης. Παρόλο που η τιμή της ταχύτητα βύθισης (Feedrate Z) φαίνεται υψηλή, για μια απλή διάτρηση σε FR4, η ταχύτητα αυτή επιτρέπει γρήγορη και καθαρή διάνοιξη χωρίς υπερθέρμανση.
- Η λειτουργία Multi-Depth παρέμεινε απενεργοποιημένη, καθώς η διάτρηση πραγματοποιήθηκε σε ένα ενιαίο πέραςμα (single pass). Η επιλογή αυτή έγινε διότι το βάθος των 1.8 mm επαρκεί για την πλήρη διαπέραση της πλακέτας και τη βύθιση του εργαλείου στην πλατφόρμα της φρέζας, διασφαλίζοντας την διάτρηση χωρίς την ανάγκη σταδιακής βύθισης.
- Παράλληλα, οι παράμετροι στην ενότητα Common Parameters διατηρήθηκαν στις προκαθορισμένες τους τιμές. Συγκεκριμένα, το ύψος αλλαγής εργαλείου, Tool change Z, παρέμεινε στα 15.0 mm και το ύψος τερματισμού, End move Z στα 0.5 mm, εξασφαλίζοντας την απαραίτητη απόσταση ασφαλείας της ατράκτου από την επιφάνεια εργασίας. Η επιλογή End move X,Y παρέμεινε στο None, ώστε η κεφαλή να παραμείνει στην τελευταία θέση κατεργασίας μετά την ολοκλήρωση της διάτρησης.

Με το πάτημα του κουμπιού Generate CNCJob object, οι ρυθμίσεις αυτές οριστικοποιούνται και παράγεται το αντίστοιχο αντικείμενο εργασίας.



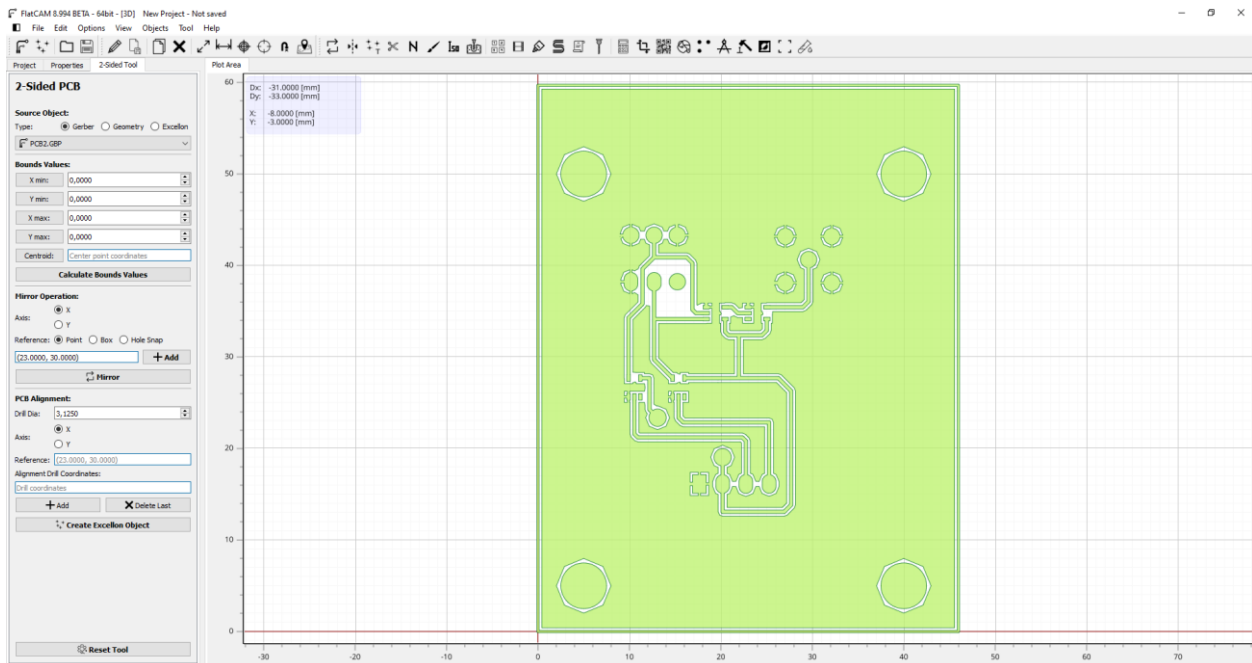
Εικόνα 91: Δημιουργία και εξαγωγή του αρχείου G-Code για την διάτρηση των οπών ευθυγράμμισης από την φρέζα CNC WEGSTR.

Μετά την παραμετροποίηση των εργαλείων, δημιουργήθηκε το νέο αντικείμενο CNC Job Object (βλ. Εικόνα 91) με την ονομασία Alignment Drills_cnc. Σε αυτό το στάδιο, το λογισμικό παρέχει μια σύνοψη της κατεργασίας, επιβεβαιώνοντας τη χρήση τρυπανιού διαμέτρου 0.3 mm και το τελικό βάθος κοπής στα -1.8 mm. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επιλογή Save CNC Code, η οποία παράγει το αρχείο μορφής G-Code που εισάγεται στον ελεγκτή του CNC μηχανήματος. Ακολουθεί η επιλογή του αρχείου Gerber για την κάτω πλευρά, Bottom Layer της πλακέτας.



Εικόνα 92: Επιλογή του αρχείου Gerber για το Bottom Layer από την καρτέλα Project.

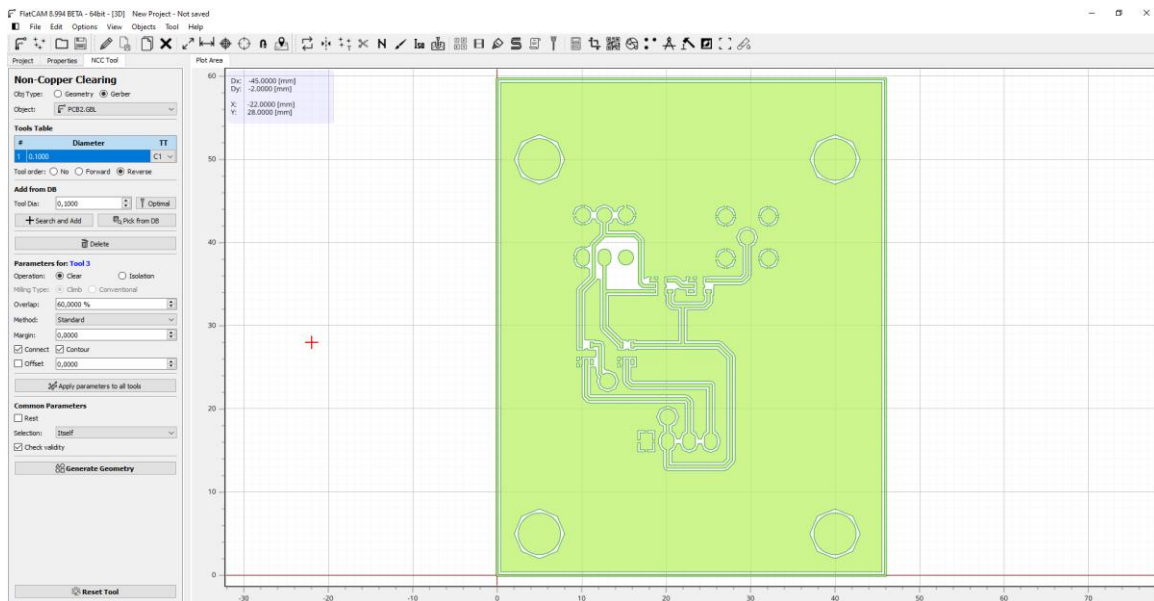
Όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 92, η επιλογή του αρχείου Gerber της κάτω πλευράς από την καρτέλα Project εμφανίζει με πράσινο φόντο τη γεωμετρία της κάτω όψews της πλακέτας.



Εικόνα 93: Διαδικασία καθρεπτισμού (Mirroring) για την κατεργασία της κάτω όψης της πλακέτας.

Για την κατεργασία της κάτω όψης της πλακέτας διπλής όψews, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2-Sided PCB του FlatCAM (βλ. Εικόνα 93). Από το στιγμιότυπο της παραπάνω εικόνας παρατηρείται ότι:

- Έχει επιλεγεί το αρχείο PCB2.GBS στο Source Object, το οποίο εμφανίζεται με πράσινο χρώμα στην περιοχή σχεδίασης.
- Η επιλογή Axis X και Reference Point εξασφαλίζουν ότι ο καθρεπτισμός θα γίνει γύρω από την οριζόντια γραμμή που διέρχεται από το κέντρο της πλακέτας. Ακολούθηθηκε η ίδια μεθοδολογία ορισμού που χρησιμοποιήθηκε και για την επάνω όψη της πλακέτας, διατηρώντας τον άξονα X ως άξονα καθρεπτισμού και το ίδιο σημείο αναφοράς (Point: 23.000, 30.000). Η ταύτιση αυτών των παραμέτρων επιβάλλεται, καθώς διασφαλίζει ότι και τα δύο επίπεδα της πλακέτας θα έχουν το ίδιο κέντρο περιστροφής, εγγυώμενη την απόλυτη γεωμετρική σύμπτωση των διαδρομών και των οπών.
- Στην ενότητα PCB Alignment, οι παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές και ταυτόσημες με εκείνες που ορίστηκαν κατά την προετοιμασία της επάνω όψης. Συγκεκριμένα, η διάμετρος του τρυπανιού (Drill Dia) παρέμεινε στα 0.3 mm και το σημείο αναφοράς (Reference) παρέμεινε αμετάβλητο, διασφαλίζοντας ότι οι οπές ευθυγράμμισης για την κάτω πλευρά θα συμπίπτουν απόλυτα με τις ήδη υπάρχουσες οπές στην πλακέτα.

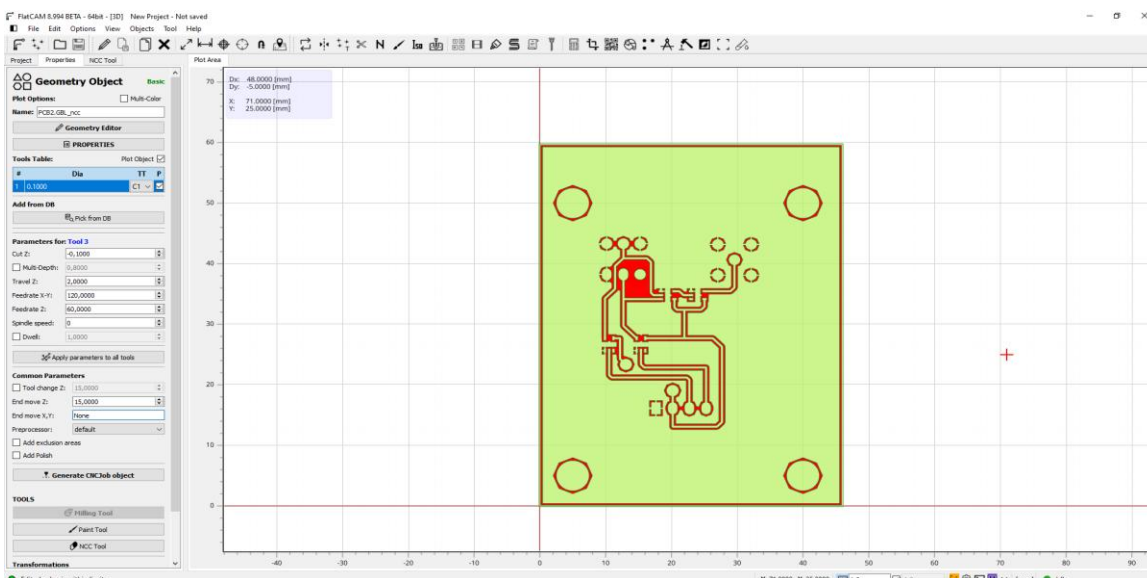


Εικόνα 94: Παραμετροποίηση της διαδικασίας αφαίρεσης χαλκού με χρήση εργαλείου διαμέτρου 0.1mm.

Μετά τον αντικατοπτρισμό της κάτω όψης, εφαρμόστηκε η λειτουργία Non-Copper Clearing για την πλήρη αφαίρεση του πλεονάζοντος χαλκού από τις μη αγωγίμες περιοχές (βλ. Εικόνα 94).

- Ως αντικείμενο πηγή (Object) επιλέχθηκε το αρχείο PCB2.GBL.
- Χρησιμοποιήθηκε εργαλείο διαμέτρου 0.1 mm.
- Ορίστηκε ένα ποσοστό επικάλυψης (Overlap) 60% μεταξύ των περασμάτων του εργαλείου, ώστε να διασφαλιστεί η πλήρης εκκένωση του χαλκού.
- Επιλέχθηκε η τυπική μέθοδος (Standard Method) σάρωσης, η οποία είναι η πλέον αξιόπιστη για ομοιόμορφα αποτελέσματα σε επίπεδες επιφάνειες.

Με το πάτημα του κουμπιού Generate Geometry, το FlatCAM υπολογίζει τις διαδρομές που θα ακολουθήσει το εργαλείο για να φρεζάρει την επιφάνεια του χαλκού, δημιουργώντας το αντίστοιχο αντικείμενο γεωμετρίας.

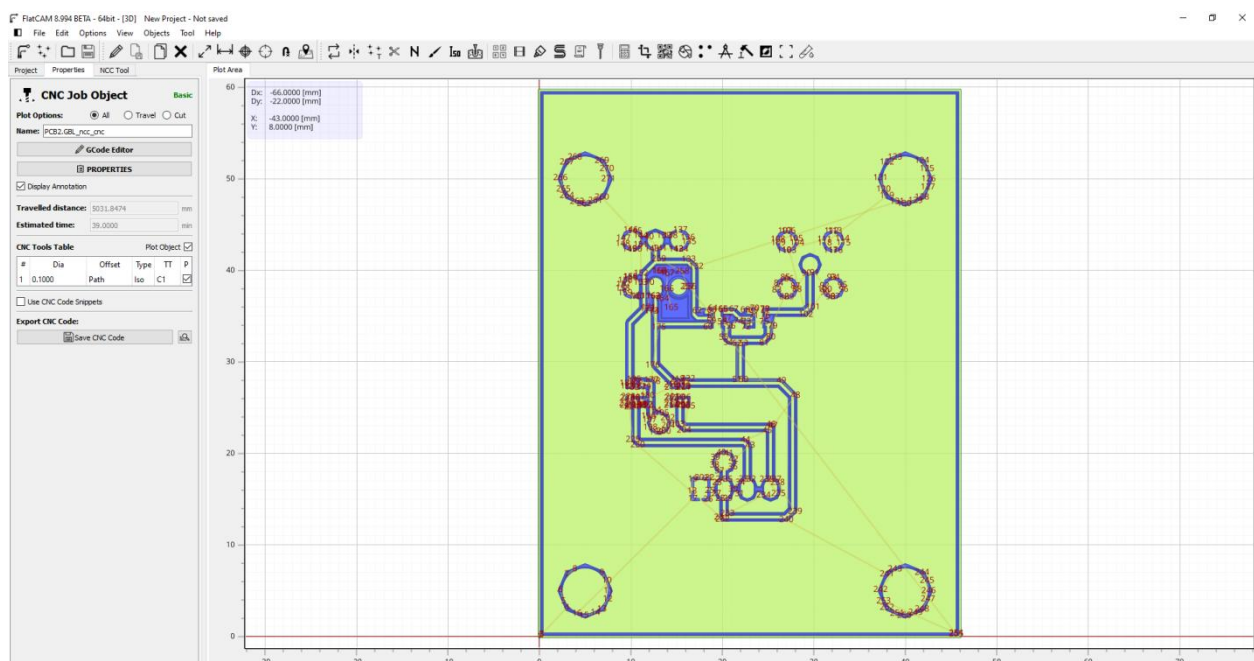


Εικόνα 95: Προσαρμογή του βάθους κοπής (Cut Z) στις ρυθμίσεις του εργαλείου 0.1mm για την παραγωγή του CNC αντικειμένου.

Μετά τη δημιουργία της γεωμετρίας καθαρισμού για την κάτω πλευρά, ορίζονται οι παράμετροι κατεργασίας στην καρτέλα Geometry Object (βλ Εικόνα 95). Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για το αρχείο PCB2.GBL_ncc είναι οι εξής:

- Χρησιμοποιήθηκε εργαλείου διαμέτρου 0.1 mm. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τον καθαρισμό του χαλκού ανάμεσα στους διαδρόμους και τα pads με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς να επηρεάζεται η ακεραιότητα του κυκλώματος.
- Ορίστηκε το βάθος Κοπής (Cut Z) στα -0.1 mm. Το βάθος αυτό είναι αρκετό για να φρεζαριστούν οι διαδρομές αλλά όχι τόσο βαθύ ώστε να φθείρει άσκοπα το εργαλείο ή το υπόστρωμα της πλακέτας FR4.
- Οι υπόλοιποι παράμετροι όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα διατηρήθηκαν στις προκαθορισμένες τους τιμές.

Στην προεπισκόπηση (Plot Area), οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν τις περιοχές σάρωσης του εργαλείου.



Εικόνα 96: Το αντικείμενο CNCJob Object πριν την μετατροπή του σε εντολές G-Code για το φρεζάρισμα της κάτω πλευράς της πλακέτας από την μηχανή CNC Wegstr.

Με την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης, παρήχθη το τελικό αντικείμενο CNC Job Object για τον καθαρισμό της κάτω όψης (βλ Εικόνα 96). Η οπτικοποίηση και τα δεδομένα που προκύπτουν όπως φαίνονται στην παραπάνω εικόνα επιβεβαιώνουν την ορθότητα της διαδικασίας:

- Οι μπλε περιοχές αναπαριστούν τις πυκνές διαδρομές σάρωσης του εργαλείου διαμέτρου 0.1 mm. Είναι εμφανές ότι ο καθαρισμός θα πραγματοποιηθεί με ακρίβεια γύρω από τους διαδρόμους και τα pads της κάτω πλευράς, διασφαλίζοντας την πλήρη ηλεκτρική απομόνωση και την αισθητική αρτιότητα του κυκλώματος.
- Η συνολική απόσταση που θα διανύσει το εργαλείο είναι περίπου 5031 mm. Η μεγάλη αυτή απόσταση οφείλεται στην ανάγκη για πολλαπλά, επικαλυπτόμενα περάσματα ώστε να εκκενωθεί πλήρως ο χαλκός. Ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης του φρεζαρίσματος είναι περίπου 39 λεπτά.
- Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επιλογή Save CNC Code. Το παραγόμενο αρχείο μεταφέρει στη μηχανή CNC όλες τις απαραίτητες πληροφορίες (συντεταγμένες, ταχύτητες και βάθος -0.1 mm), ολοκληρώνοντας έτσι τη ροή εργασιών για την κάτω πλευρά της πλακέτας.

Ανακεφαλαιώνοντας, με την ολοκλήρωση της προετοιμασίας των απαραίτητων αρχείων στο FlatCAM, η διαδικασία κατασκευής της πλακέτας διπλής όψης (double-sided PCB) συνοψίζεται στα εξής στάδια: Αρχικά, δημιουργούνται τα αντικείμενα εργασίας CNC (CNC Job Objects) για το άνω στρώμα (Top Layer), το κάτω στρώμα σε κατοπτρική μορφή (Bottom Layer - Mirrored) και τις οπές ευθυγράμμισης (Alignment Holes). Η διαδικασία ξεκινά με τη διάτρηση των οπών ευθυγράμμισης τόσο στην πλακέτα όσο και στην πλατφόρμα της εργαλειομηχανής. Αφού ολοκληρωθεί η κατεργασία της επάνω όψης, η πλακέτα αναστρέφεται και ευθυγραμμίζεται με ακρίβεια μέσω της τοποθέτησης πείρων στις προϋπάρχουσες οπές. Τέλος, πραγματοποιείται η μηχανική κατεργασία της κάτω όψης της πλακέτας.

Καταλήγοντας, μέσω του λογισμικού FlatCAM, πραγματοποιείται ο προγραμματισμός της εργαλειομηχανής CNC WEGSTR για την παραγωγή τυπωμένων κυκλωμάτων. Το λογισμικό υπολογίζει τις βέλτιστες διαδρομές κίνησης του κοπτικού εργαλείου, μετατρέποντας τον ψηφιακό σχεδιασμό σε εντολές κατεργασίας. Η ορθή επιλογή και ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων των εργαλείων αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη διασφάλιση της κατασκευαστικής ακρίβειας. Με τον τρόπο αυτό, η θεωρητική γεωμετρία του σχεδίου μεταφέρεται με υψηλή πιστότητα στο υπόστρωμα του χαλκού, ελαχιστοποιώντας τις αποκλίσεις.

4.6 Κοπτικά Εργαλεία της Μηχανής CNC WEGSTR

Το φρεζάρισμα είναι η κατεργασία αφαίρεσης χαλκού από την πλακέτα, όπου μπορούν να δημιουργηθούν πολύπλοκες γεωμετρίες ανάλογα με τη δυνατότητα του κοπτικού εργαλείου και του άξονα περιστροφής της εργαλειομηχανής. Με τον όρο κοπτικό εργαλείο, προσδιορίζεται το εργαλείο που χρησιμοποιείται για την κατεργασία μεταλλικών ή μη μεταλλικών υλικών με την κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Η χρήση τους είναι να αφαιρούν υλικό με τη μέθοδο της κοπής και γι' αυτό ονομάζονται κοπτικά εργαλεία. Στο φρεζάρισμα η κοπή πραγματοποιείται με την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου. Η γωνιακή ταχύτητα της περιστροφής αποτελεί σημαντική παράμετρο της ταχύτητας κοπής.

Τα κοπτικά εργαλεία φρεζαρίσματος που χρησιμοποιούνται στις μηχανές Wegstr τηρούν τα εξής πρότυπα. Η διάμετρος του στελέχους δηλαδή το σημείο που κουμπώνει το κοπτικό εργαλείο στη μηχανή CNC Wegstr είναι σταθερό στα 3,175mm. Είναι το πιο κοινό μέγεθος για μικρά CNC, Laser Cutters και Dremel. Έτσι δεν απαιτείται η αλλαγή φωλιάς (collet) στη μηχανή κάθε φορά που αλλάζει το κοπτικό εργαλείο και ταιριάζει στα εργαλεία της αγοράς. Η κεφαλή διαθέτει βίδα σύσφιξης (set screw) για τη σταθεροποίηση του κοπτικού εργαλείου. Και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου λειτουργεί σταθερά στις 11.000 RPM.

Εκτός από την αφαίρεση χαλκού τα εργαλεία φρεζαρίσματος (Milling Bits) χρησιμοποιούνται για την κοπή περιγραμμάτων, το άνοιγμα υποδοχών (slots) και τη διάτρηση οπών. Τα κοπτικά εργαλεία φρεζαρίσματος για την εργαλειομηχανή CNC Wegstr κατατάσσονται σε:

➤ **Κονδύλια (End Mills)**, πρόκειται για κυλινδρικούς κοπτήρες όπου οι κοπτικές πλευρές τους είναι ελικοειδείς (βλ Εικόνα 97). Δουλεύουν πάντα κάθετα και υπάρχουν σε διάφορα μεγέθη (διαμέτρου και μήκους). Χρησιμοποιούνται για το κόψιμο της πλακέτας στο τελικό της σχήμα (Contouring) ή για μεγάλα κενά. Τα δίφτερα κονδύλια (Two Flute End Mills) παρέχουν καλύτερο φινίρισμα. Προτείνεται για το τελικό κόψιμο της πλακέτας αυτά με διάμετρο 0,6 mm ή 0,8 mm. Τα μονόφτερα κονδύλια (One Flute End Mills) είναι ιδανικά για πλαστικό και αλουμίνιο ή όταν η πλακέτα έχει πλαστική επικάλυψη ή για εργασία με λιπαντικό.



Εικόνα 97: Κονδύλια (End Mills) της φρέζας CNC Wegstr.

➤ **Κοπτικά Χάραξης (Engraving Bits)**, έχουν σχήμα «V» με διάφορες γωνίες (10° , 20° , 30° , 45° , 60° , 90°) και είναι απαραίτητα για τη δημιουργία των λεπτών διαδρομών και τη χάραξη κειμένου σε μια πλακέτα (βλ Εικόνα 98). Για ισορροπία ανάμεσα στην λεπτομέρεια και στην αντοχή της μύτης του εργαλείου, η καλύτερη επιλογή γωνίας είναι από 30° έως 60° . Η εταιρεία Wegstr προτείνει τα 30° spiral carbide bits για την απομάκρυνση του χαλκού. Για εξαιρετικά λεπτές διαδρομές χρησιμοποιούνται τα εργαλεία με τη γωνία 10° , όμως η μύτη τους είναι πάρα πολύ εύθραυστη και σπάει εύκολα, αν η πλακέτα δεν είναι απόλυτα επίπεδη. Ο χαλκός στις κοινές πλακέτες έχει πάχος περίπου $0,035 \text{ mm}$ γι' αυτό όταν φρεζάρεται μια πλακέτα με τα εργαλεία χάραξης ρυθμίζεται το βάθος κοπής γύρω στα $0,05 \text{ mm}$ έως $0,1 \text{ mm}$. Αν αυξηθεί το βάθος κοπής η γραμμή θα γίνει πιο πλατιά απ' ό τι σχεδιάστηκε λόγω του κωνικού σχήματος «V» του εργαλείου.



Εικόνα 98: Κοπτικά Χάραξης (Engraving Bits) της εργαλειομηχανή CNC Wegstr.

➤ **Σπειροειδή Κονδύλια (Spiral Pattern)**, των οποίων οι λεπίδες είναι τυλιγμένες γύρω από το σώμα τους σε σχήμα έλικας. Η εργαλειομηχανή CNC Wegstr τα καθιστά ιδανικά για φρεζάρισμα λεπτού ξύλου ή αλουμινίου. Λόγω της γεωμετρίας τους τα εργαλεία αυτά ασκούν λιγότερη απότομη πίεση.

Ο σπειροειδής σχεδιασμός των εργαλείων αυτών επιτρέπει στη λεπίδα να βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το αντικείμενο εργασίας, μειώνοντας έτσι τους κραδασμούς. Παρέχουν καθαρή κοπή στις ακμές, μειώνοντας την ανάγκη για τρίψιμο μετά την κατεργασία.

➤ **Τρυπάνια για οπές (PCB Drill Bits)**, χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη κυλινδρικών οπών (vias) και την τοποθέτηση εξαρτημάτων (Through Hole). Η επαφή του εργαλείου με την πλακέτα είναι συνεχής έως ότου τελειώσει η κατεργασία. Τα τρυπάνια (βλ Εικόνα 99) είναι σχεδιασμένα να διαπερνούν το σκληρό και λειαντικό υλικό των πλακετών το FR-4 (Flame Retardant 4) που αποτελείται από υφαντό υαλοβάμβακα για μηχανική αντοχή και εποξειδική ρητίνη που λειτουργεί ως συνδετικό υλικό και μονωτής. Λόγω της περιεκτικότητας των πλακετών σε υαλοβάμβακα, τα κοινά τρυπάνια ατσάλιου (HSS) στομώνουν εύκολα. Γι’ αυτό τα τρυπάνια της φρέζα CNC Wegstr είναι από συμπαγές καρβίδιο βολφραμίου, τα οποία διατηρούν την κόψη τους. Η χρυσή επίστρωση νιτρίδιου του τιτανίου μειώνει την τριβή και τη θερμότητα, παρατείνοντας τη ζωή του εργαλείου. Ο ελικοειδής σχεδιασμός των τρυπανιών απομακρύνει τη σκόνη από την οπή, αποτρέποντας το μπλοκάρισμα και το σπάσιμο της μύτης. Για διασυνδέσεις μεταξύ των στρώσεων της πλακέτας (vias) προτείνονται τρυπάνια διαμέτρου 0,3 mm - 0,5 mm.



Εικόνα 99: Τρυπάνια (Drill Bits) της μηχανής CNC Wegstr.

Για αντιστάσεις, πυκνωτές και διόδους (Standard Leads) προτείνονται τρυπάνια διαμέτρου 0,7 mm - 0,9 mm. Για τους ακροδέκτες των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, για τα τρανζίστορ ισχύος και pins σύνδεσης προτείνονται τρυπάνια διαμέτρου 1,0 mm - 1,1 mm. Για τρυπάνια κάτω του 1 mm, η ταχύτητα καθόδου πρέπει να είναι αργή και σταθερή (περίπου 100-150 mm/min) για να αποφευχθεί η θραύση. Τα τρυπάνια αυτά είναι ευαίσθητα σε ένα μικρό κραδασμό ή σε λανθασμένη ευθυγράμμιση της πλακέτας. Η Wegstr διαθέτει ένα έτοιμο πακέτο (Set for PCB - βλ Εικόνα 100) που περιλαμβάνει 10 τρυπάνια (0,2-1,1 mm), εργαλεία χάραξης (10°, 15°, 20°, 30°, 45°), κονδύλια 0,6 mm και 0,8 mm και ελατήρια πίεσης τα οποία είναι απαραίτητα για την τεχνική χάραξη ώστε να διατηρείται σταθερό το βάθος κοπής.



Εικόνα 100: Σετ για PCB κατασκευή από την Wegstr.

Για την διατήρηση των κοπτικών εργαλείων σε άριστη κατάσταση και την εξασφάλιση της ακρίβειας της φρέζας CNC Wegstr, πρέπει να ακολουθούνται οι εξής συμβουλές συντήρησης αυτών:

- Καθαρισμός από σκόνη: Μετά από κάθε κοπή, ειδικά σε FR4, προτείνεται προσεκτικός καθαρισμός του εργαλείου και της υποδοχής αυτού με ένα πινέλο ή πεπιεσμένο αέρα. Η συσσωρευμένη σκόνη υαλοβάμβακα μπορεί να προκαλέσει αστάθεια.
- Έλεγχος για μαύρα σημάδια: Αν το κοπτικό αφήνει μαύρα σημάδια στην πλακέτα, σημαίνει ότι έχει στομώσει ή ότι οι στροφές είναι πολύ υψηλές για την ταχύτητα κίνησης.
- Λίπανση: Για κοπή αλουμινίου, η χρήση μιας σταγόνας ειδικού λαδιού κοπής παρατείνει σημαντικά τη ζωή του εργαλείου.
- Αποθήκευση: Τα λεπτά άκρα των κοπτικών εργαλείων, όπως των 0,1mm ή 0,2mm, σπάνε εύκολα με την επαφή με άλλα μεταλλικά αντικείμενα.

4.7 Κώδικας Μηχανής

Η απaráμιλλη αποτελεσματικότητα και ακρίβεια της κατεργασίας με την φρέζα CNC Wegstr για την κατασκευή πλακετών, βασίζεται στον κώδικα G (G-Code) ή γεωμετρικό κώδικα, που ελέγχει τις κινήσεις και τις ενέργειες της φρέζας. Δημιουργείται από ένα λογισμικό CAM. Το λογισμικό CAM δημιουργεί τις διαδρομές των εργαλείων και οδηγίες G-Code που θα φορτωθούν στη μηχανή CNC για εκτέλεση.

Ένα αρχείο G-Code είναι ένα αρχείο απλού κειμένου με κάθε γραμμή να περιέχει συγκεκριμένη εντολή. Οι εντολές γράφονται με συγκεκριμένη σύνταξη που περιλαμβάνει συνδυασμό γραμμάτων και αριθμών. Χρησιμοποιώντας καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων, ο G-Code καθοδηγεί την εργαλειομηχανή σχετικά με τη μετακίνηση του εργαλείου σε συγκεκριμένη θέση, την αλλαγή του εργαλείου, τη ρύθμιση της ταχύτητας και τη θέση του τεμαχίου εργασίας.

Κάθε εντολή ξεκινά με ένα αλφαριθμητικό κωδικό, επιτρέποντας στους χειριστές να αυτοματοποιούν τη διαδικασία κατεργασίας εξασφαλίζοντας ακριβείς κοπές. Οι κοινές εντολές ξεκινάνε με το γράμμα G ή με το γράμμα M. Οι κωδικοί G ελέγχουν τις κινήσεις της εργαλειομηχανής ενώ οι κωδικοί M επιβλέπουν διάφορες λειτουργίες όπως την αλλαγή εργαλείου. Ο συνδυασμός των εντολών G-Code και M-Code δημιουργούν ένα πλήρες αρχείο προγραμματισμού CNC. Ο μικροελεγκτής προγραμματισμού CNC είναι προγραμματισμένος να εκτελεί τη συγκεκριμένη εντολή.

4.7.1 Εντολές G-Code που Χρησιμοποιούνται στη Μηχανή CNC Wegstr

Ακολουθεί μια δομημένη παρουσίαση των εντολών που υποστηρίζει προς το παρόν η μηχανή CNC Wegstr για τις εργασίες της.

❖ Οι ακόλουθοι κωδικοί ελέγχουν την κίνηση και την διαδρομή του εργαλείου:

G00: Ταχεία κίνηση του εργαλείου σε συγκεκριμένες συντεταγμένες χωρίς κοπή χαλκού. Χρησιμοποιείται για τοποθέτηση πριν την έναρξη της εργασίας. Οι κινήσεις γίνονται με την υψηλότερη ταχύτητα, χωρίς να απαιτείται καθορισμένος ρυθμός τροφοδοσίας. Οι συντεταγμένες θέσης στους άξονες X, Y και Z είναι απαραίτητες.

G01: Γραμμική παρεμβολή που καθοδηγεί το εργαλείο κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής από το ένα σημείο στο άλλο, με συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης για την πραγματοποίηση κοπής.

G02: Δίνει εντολή στο εργαλείο κοπής να ακολουθεί ένα τόξο με φορά δεξιόστροφα αντί για ευθεία γραμμή. Απαιτείται ένας καθορισμένος ρυθμός τροφοδοσίας μαζί με λεπτομέρειες σχετικά με το κεντρικό σημείο του τόξου ή την ακτίνα (βλ Εικόνα 101).

G03: Κυκλική κίνηση με αριστερόστροφη φορά (βλ Εικόνα 101).

G02 clockwise G03 counterclockwise



Εικόνα 101: Οι εντολές G02 και G03.

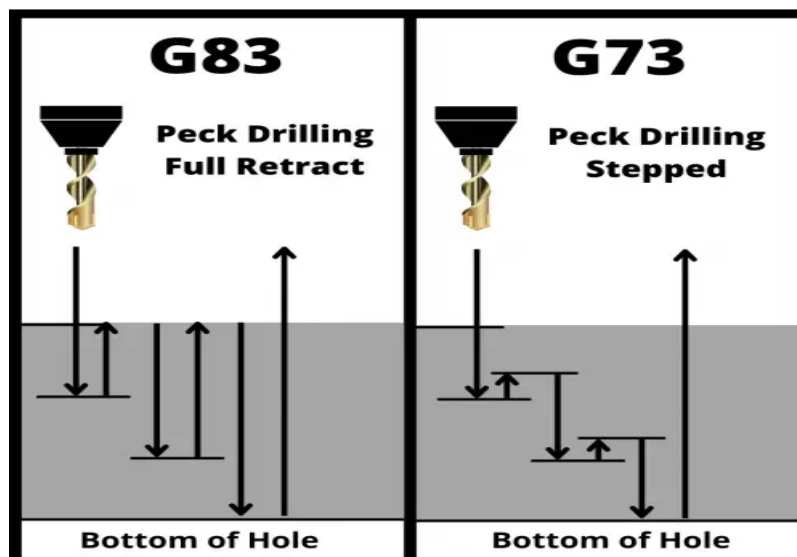
❖ Οι εντολές για την αυτοματοποίηση των κινήσεων του τρυπανιού, είναι:

G73: Χρησιμοποιείται για τη διάτρηση με σπάσιμο των γρεζιών (Chip Breaking). Το σπάσιμο των γρεζιών είναι η τεχνική όπου η κίνηση του εργαλείου διακόπτεται σκόπιμα για να αποφευχθεί η δημιουργία μακριών συνεχόμενων κομματιών που παράγονται όταν το τρυπάνι κόβει το μέταλλο. Το τρυπάνι κατεβαίνει τμηματικά και δεν βγαίνει τελείως από την οπή, αλλά ανασύρεται μόνο μια μικρή απόσταση για να σπάσει το γρέζι πριν συνεχίσει. Ο κωδικός αυτός είναι ιδανικός για οπές που δεν είναι πολύ βαθιές (βλ Εικόνα 102).

G81: Χρησιμοποιείται για απλές οπές όπου δεν απαιτείται ιδιαίτερη επεξεργασία του πυθμένα. Το τρυπάνι κατεβαίνει απευθείας στο τελικό βάθος με την καθορισμένη ταχύτητα πρόωσης και στη συνέχεια ανασύρεται γρήγορα. Είναι ο απλούστερος κύκλος που κάνει το τρυπάνι.

G82: Παρόμοιος κωδικός με τον G81, μόνο που προσθέτει μια παύση στο κάτω μέρος της οπής πριν το ανέβασμα. Αυτό βοηθάει στη βελτίωση του φινιρίσματος και της ακρίβειας του βάθους, ειδικά σε τυφλές οπές.

G83: Το τρυπάνι κατεβαίνει τμηματικά, αλλά μετά από κάθε βήμα ανεβαίνει πλήρως έξω από την οπή, για να απομακρυνθούν τελείως τα γρέζια (βλ Εικόνα 102).



Εικόνα 102: Οι εντολές G73 και G83.

4.7.2 Τύποι Εντολών M που Χρησιμοποιούνται στη Μηχανή CNC Wegstr

Ενώ οι κωδικοί G πραγματοποιούν την πραγματική κοπή ή τη διαμόρφωση του αντικειμένου, ο M-Code φροντίζει για εργασίες που δεν περιλαμβάνουν μετακίνηση. Καθορίζει τις βοηθητικές λειτουργίες του μηχανήματος, όπως την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του μηχανήματος, την περιστροφή της ατράκτου και την αλλαγή εργαλείου. Οι κωδικοί G κατευθύνουν το μηχάνημα

που να πάει, ενώ οι κωδικοί M ελέγχουν τη δράση του όταν φτάσει εκεί. Ως εκ τούτου, ο κώδικας M επιτρέπει στην μηχανή CNC Wegstr να εκτελεί ακριβείς ενέργειες.

Η έξυπνη ένταξη κωδικών M για την εκτέλεση των διαδικασιών CNC βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα και την ταχύτητα της κατεργασίας. Μια εντολή M-Code περιλαμβάνει το γράμμα «M» συνοδευόμενο από δύο αριθμούς. Το «M» από τη λέξη Machine δείχνει ότι οι κωδικοί αυτοί ελέγχουν διαφορετικές λειτουργίες της μηχανής. Διαβάζονται από την μονάδα ελέγχου του μηχανήματος, ερμηνεύοντας τες σε ακριβείς ενέργειες, σε πραγματικό χρόνο. Οι κωδικοί παραμένουν σε ισχύ μέχρι να τους σταματήσει κάποιος άλλος κωδικός. Ακολουθούν οι εξέχοντες κωδικοί M που διέπουν τη λειτουργία της φρέζας Wegstr CNC.

❖ *Εντολές ελέγχου προγράμματος:*

M00: Προγραμματισμένη παύση του μηχανήματος ώστε να γίνει η αλλαγή του εργαλείου. Άλλες χρήσεις της εντολής αυτής είναι για να γίνει έλεγχος της ποιότητας της κοπής στη μέση της διαδικασίας ή για να καθαριστεί από τα γρέζια η επιφάνεια εργασίας με ασφάλεια.

❖ *Εντολές ελέγχου της ατράκτου, του μοτέρ που περιστρέφει το κοπτικό εργαλείο:*

M03: Εκκίνηση της ατράκτου με δεξιόστροφη φορά.

M04: Εκκίνηση της ατράκτου με αριστερόστροφη φορά.

M05: Απενεργοποιεί πλήρως τη λειτουργία της ατράκτου. Ένας σημαντικός κωδικός, που πρέπει να υπάρχει πάντα στο τέλος μιας εργασίας ή πριν από μια παύση (M00) για λόγους ασφαλείας. Αν δεν δοθεί αυτή η εντολή στο τέλος του κώδικα, η κεφαλή μπορεί να συνεχίσει να περιστρέφεται ακόμα και αν η κίνηση των αξόνων έχει σταματήσει.

❖ *Εντολή αλλαγής εργαλείου*

M06: Μόλις ο έλεγχος διαβάσει την εντολή αυτή σταματά την κίνηση των αξόνων και την περιστροφή της ατράκτου. Η κεφαλή ανεβαίνει σε ένα ύψος ασφαλείας που έχει οριστεί (Z-Axis) για να τοποθετηθεί το νέο εργαλείο. Αφού ολοκληρωθεί η αλλαγή με το πάτημα του κουμπιού Start το λογισμικό της μηχανής συνεχίζει την κοπή.

Ο κωδικός **M47** ένας από τους υποστηριζόμενους κωδικούς M-Code που δέχεται η εργαλειομηχανή CNC Wegstr, χρησιμοποιείται για την επανάληψη του προγράμματος από την πρώτη γραμμή. Στο λογισμικό ελέγχου της Wegstr, αυτός ο κωδικός επιτρέπει τη συνεχή εκτέλεση μιας εργασίας χωρίς χειροκίνητη επανεκκίνηση από τον χρήστη.

Ο G-Code και ο M-Code λειτουργούν συνδυαστικά ως η γλώσσα προγραμματισμού της μηχανής CNC, μετατρέποντας τα ψηφιακά σχέδια (CAD/CAM) σε φυσικά αντικείμενα. Οι εντολές μπαίνουν σε σειρά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω τυπικό παράδειγμα της μηχανής CNC Wegstr.

1. M03 S11000: (M-Code) ανάβει το μοτέρ (spindle) στις 11.000 στροφές.
2. G00 X10 Y10: (G-Code) πηγαίνει πάνω από το σημείο έναρξης.
3. G01 Z-1 F200: (G-Code) κατεβαίνει αργά στην πλακέτα για να ξεκινήσει η κοπή.
4. G01 X50: (G-Code) κόβει σε ευθεία γραμμή μέχρι το X=50.
5. G00 Z5: (G-Code) σηκώνει το εργαλείο ψηλά.
6. M05: (M-Code) σταματάει το μοτέρ.
7. M30: (M-Code) τερματίζει το πρόγραμμα.

4.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [4.1] AT-Machining. (χ.χ.). Τα πάντα για τη σύνθετη κατεργασία CNC. Ανακτήθηκε στις [5 Απριλίου 2026], από <https://at-machining.com/el/everything-about-complex-cnc-machining/>
- [4.2] EasyEDA. (2020, Ιούνιος 14). EasyEDA Tutorial (v6.3.53). Ανακτήθηκε από lceda.cn
- [4.3] Εργαστήριο VCAS. (χ.χ.). Αρχική Σελίδα. Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Ανακτήθηκε στις (5 Απριλίου 2026), από <https://vcas.cs.uoi.gr/el/home/>
- [4.4] FlatCAM. (χ.χ.). FlatCAM Manual. Ανακτήθηκε στις (5 Απριλίου 2026), από <http://flatcam.org/manual/index.html>
- [4.5] STYLECNC. (χ.η.). Τι είναι η κατεργασία CNC;. STYLECNC. Ανακτήθηκε 20 Απριλίου 2026 από <https://el.stylecnc.com/blog/cnc-machining.html>
- [4.6] Wegstr s.r.o. (2022). Instruction Manual: CNC Milling Machine Type Wegstr. Ανακτήθηκε από wegstr.com

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΟΝΗΣ ΟΨΕΩΣ

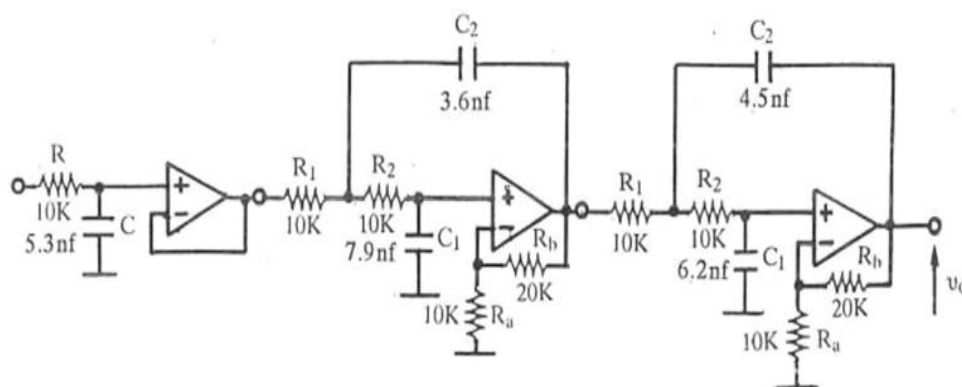
5.1 Σχεδίαση και Υλοποίηση Βαθυπερατού Φίλτρου Butterworth

Οι μεγάλες εργαλειομηχανές CNC απαιτούν έλεγχο παραλαβής αμέσως μετά την εγκατάσταση τους, παρά τους ποιοτικούς ελέγχους των κατασκευαστών. Αυτό κρίνεται απαραίτητο καθώς οι μεγάλες αποστάσεις και τα μέσα μεταφοράς (πλοία, φορτηγά κ.τ.λ.) από χώρες όπως η Γερμανία ή η Ιαπωνία, ενδέχεται να επηρεάσουν την ακρίβεια και τις προδιαγραφές τους.

Παρά την προσεγμένη συσκευασία, οι κραδασμοί και τα χτυπήματα κατά τη μεταφορά μπορεί να προκαλέσουν βλάβες ή απορρυθμίσεις στις εργαλειομηχανές. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, διενεργούνται δοκιμές παραλαβής (acceptance tests) βάσει διεθνών προτύπων (ISO, DIN, κ.α.). Η διαδικασία περιλαμβάνει την κατεργασία ενός τυποποιημένου δοκιμαστικού, το οποίο πρέπει να πληροί συγκεκριμένες ανοχές ώστε ο πελάτης να αποδεχτεί τη μηχανή. Σε αντίθετη περίπτωση, ο κατασκευαστής οφείλει να την επισκευάσει ή να την αντικαταστήσει.

Στην περίπτωση της επιτραπέζιας φρέζας CNC Wegstr, αντί για τυπικό έλεγχο παραλαβής, επιλέχθηκε η αξιολόγηση των επιδόσεων σε ακρίβεια και ποιότητα στο φρεζάρισμα και στην κοπή. Η έρευνα εστιάζει στην αποτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών της μηχανής κατά την κατεργασία μιας πλακέτας (PCB).

Στο πλαίσιο αυτό θα υλοποιηθεί ένα βαθυπερατό φίλτρο Butterworth 5ης τάξης. Πρόκειται για μια διάταξη τριών σταδίων συνδεδεμένων σε σειρά, η οποία δημιουργεί ένα φίλτρο 5ης τάξης. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από ένα παθητικό κύκλωμα RC που ακολουθείται από έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία απομονωτή (buffer). Αυτό είναι ένα βαθυπερατό φίλτρο 1ης τάξης. Το δεύτερο στάδιο είναι ένα ενεργό φίλτρο τοπολογίας Sallen-Key. Επειδή έχει δύο πυκνωτές και δύο αντιστάσεις στο κύκλωμα ανάδρασης, είναι ένα βαθυπερατό φίλτρο 2ης τάξης. Το τρίτο στάδιο είναι πανομοιότυπο σε τοπολογία με το δεύτερο στάδιο αλλά με διαφορετικές τιμές πυκνωτών. Αποτελεί επίσης ένα βαθυπερατό φίλτρο 2ης τάξης. Τα φίλτρα αυτά χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη επίπεδη απόκριση στη ζώνη διέλευσης, δηλαδή δεν έχουν διακυμάνσεις πριν τη συχνότητα αποκοπής. Η 5η τάξη σημαίνει ότι το φίλτρο είναι πολύ απότομο. Μετά τη συχνότητα αποκοπής, η εξασθένιση αυξάνεται με ρυθμό -100 dB/ decade.



Εικόνα 103: Το βαθυπερατό ΦΧΣ Butterworth 5ης τάξης.

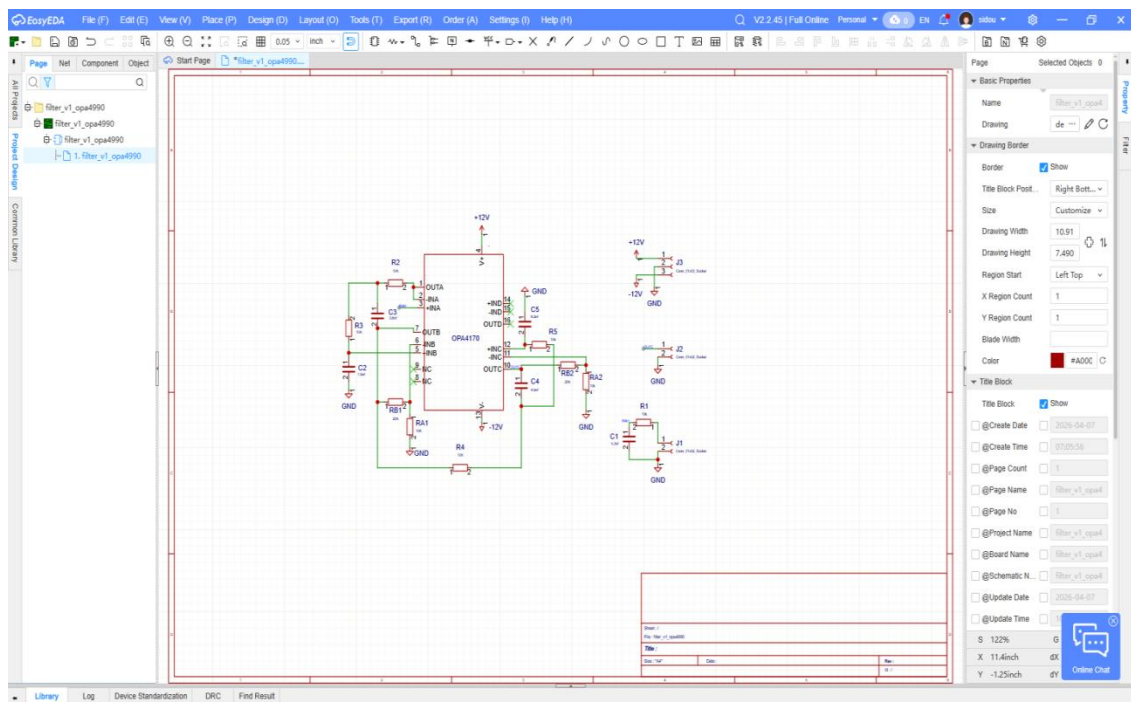
Όπως προαναφέρθηκε, για τις ανάγκες σχεδίασης των PCB χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο EasyEDA Pro, το οποίο αποτελεί το βασικό λογισμικό CAD της εργασίας. Το πρώτο βήμα είναι ο εντοπισμός των footprints όλων των εξαρτημάτων, δηλαδή των εκτεθειμένων επαφών που απαιτείται να υπάρχουν πάνω στην πλακέτα ώστε να κολληθεί το κάθε εξάρτημα. Τα footprints για τα περισσότερα εξαρτήματα βρίσκονται έτοιμα σε διάφορες βιβλιοθήκες ενώ για τα πιο ασυνήθιστα εξαρτήματα απαιτείται η σχεδίαση τους.

Η επιλογή των εξαρτημάτων για μια πλακέτα PCB απαιτεί προσοχή στα footprints, ώστε οι επαφές τους να ταιριάζουν ακριβώς για τη σωστή κόλληση. Παράλληλα πρέπει να επιλέγεται ένα μέγεθος που να εξοικονομεί χώρο, αλλά να παραμένει αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει την εύκολη χειροκίνητη κόλληση αν χρειαστεί.

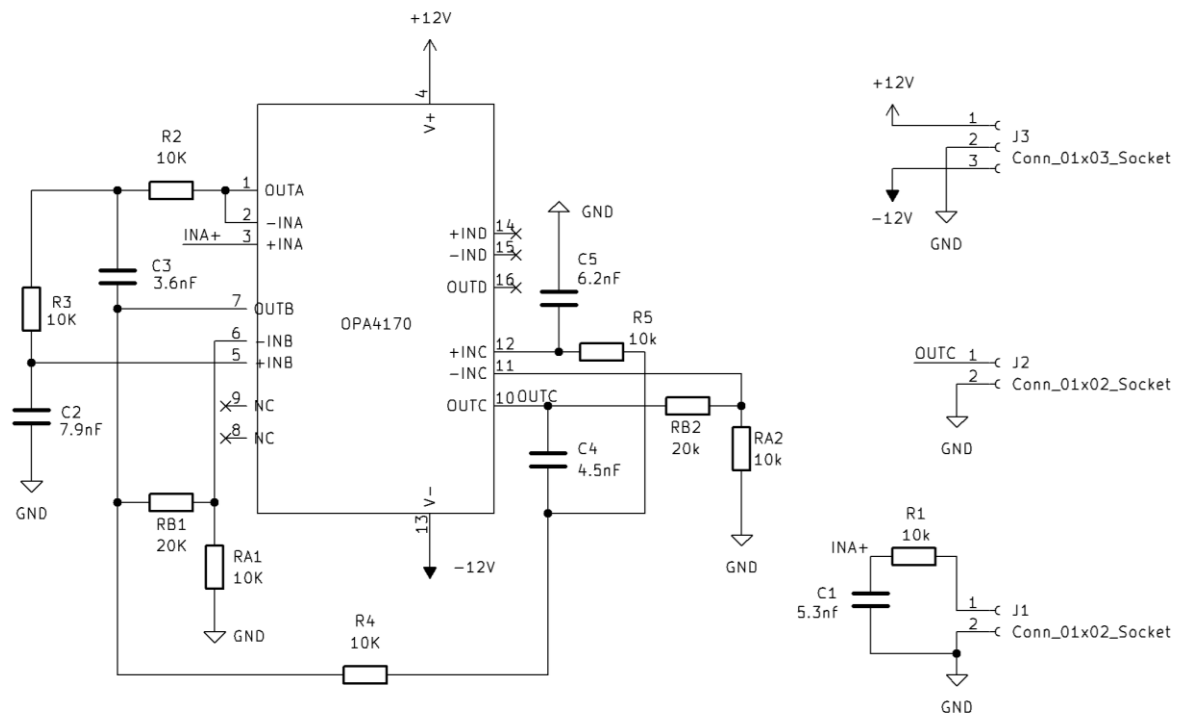
Το κύκλωμα της Εικόνας 103 αποτελείται από τρία στάδια, έναν απομονωτή (buffer) και δύο ενεργά φίλτρα Sallen-Key. Αντί να κολληθούν τρία εξαρτήματα (chips) στην πλακέτα χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα που τα περιέχει όλα εσωτερικά. Επιλέχθηκε ο OPA4170 σε συσκευασία SOIC-14 τετραπλός (quad) τελεστικός ενισχυτής. Έτσι υλοποιήθηκε το κύκλωμα με ένα μόνο chip, αφήνοντας έναν ενισχυτή εφεδρικό. Η συσκευασία SOIC-14 είναι τύπου SMD, επιφανειακής στήριξης. Καταλαμβάνει πολύ λιγότερο χώρο στο PCB σε σχέση με τη χρήση τριών ξεχωριστών ICs, κάτι που διευκολύνει τη σχεδίαση στο EasyEDA Pro.

Ο OPA4170 προσφέρει ευρύ φάσμα τάσης τροφοδοσίας (4.5V ως 36V) και χαμηλό offset voltage. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα φίλτρα θα έχουν υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα στις συχνότητες αποκοπής που ορίζουν οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές του σχήματος. Ακόμη επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή αιώρηση του σήματος εξόδου V_o κάτι σημαντικό για ενεργά φίλτρα που λειτουργούν με χαμηλές τάσεις τροφοδοσίας.

Μετά την επιλογή των footprints, τοποθετούνται στο σχηματικό διάγραμμα, όπου ορίζονται οι συνδέσεις βάσει του datasheet. Η χρήση ετικετών διευκολύνει την ανάγνωση, υποδεικνύοντας ποια σημεία θα ενωθούν με tracks, προετοιμάζοντας έτσι το έδαφος για την τελική σχεδίαση (layout) του PCB.

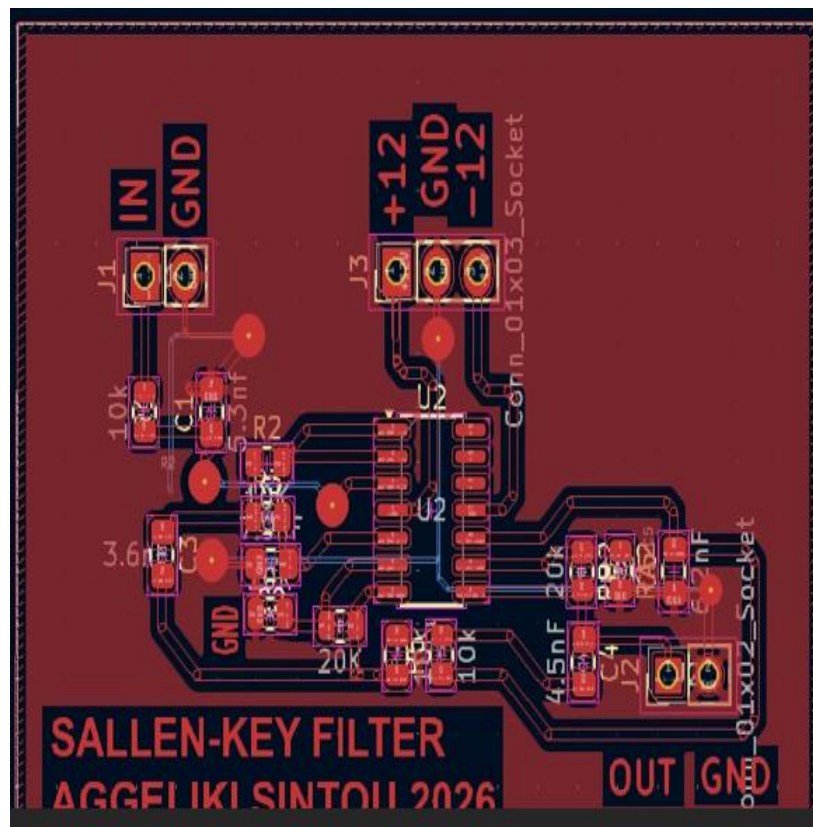


Εικόνα 104: Σχηματικό διάγραμμα ενεργού ΦΧΣ Butterworth.



Εικόνα 105: Μεγέθυνση του σχηματικού διαγράμματος του ΦΧΣ Butterworth για την ανάδειξη των τιμών των εξαρτημάτων.

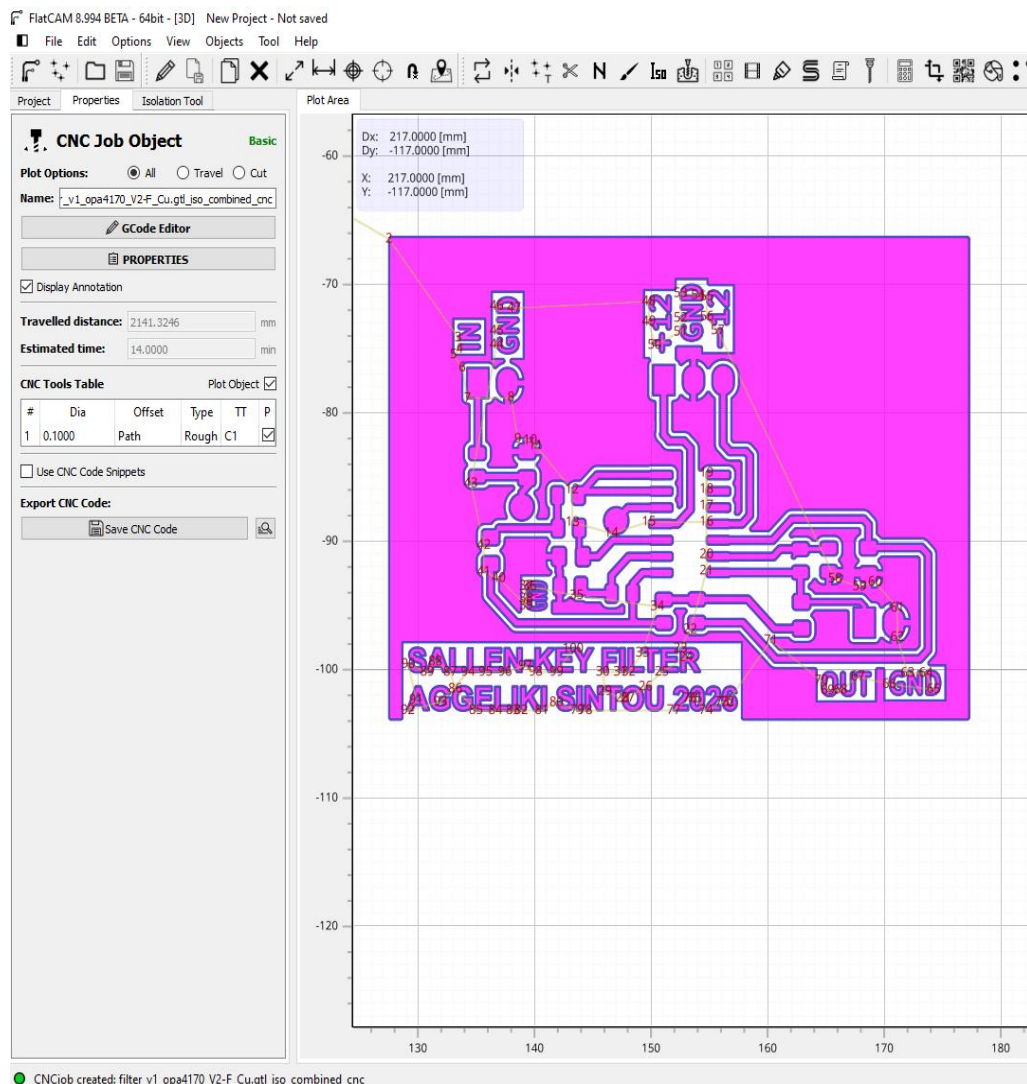
Γενικά, κατά το σχεδιασμό μιας διάταξης (layout), προτεραιότητα είναι η στρατηγική τοποθέτηση των εξαρτημάτων για εύκολη συνδεσμολογία, ελάχιστες παρεμβολές και προσβασιμότητα από τον χρήστη (βλ Εικόνα 104). Στην Εικόνα 105 αποτυπώνεται το καθαρό ηλεκτρονικό σχέδιο της διάταξης, όπου αναγράφονται με σαφήνεια οι ακριβείς τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του φίλτρου. Παράλληλα, επιδιώκεται η αποφυγή διασταυρώσεων στα tracks και ο σωστός υπολογισμός του πάχους τους ανάλογα με τα ρεύματα που θα διαρρέουν το κύκλωμα. Ακολουθεί η μετατροπή του σχηματικού σε PCB (βλ Εικόνα 106) και η εξαγωγή των Gerber Files (οι διαδρομές χαλκού, αρχεία σε .GTL, .GBL), των Excellon Files (τα δεδομένα για τις οπές σε .DRL, .TXT) και το Board Outline (το περίγραμμα της πλακέτας που καθορίζει το σχήμα της, συνήθως σε .GKO ή .GML) (βλ Εικόνα 107).



Εικόνα 106: Απεικόνιση της άνω πλευράς του ΦΧΣ Butterworth.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, για τη μετατροπή των σχεδιαστικών δεδομένων σε κώδικα μορφής G-Code, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FlatCAM. Κατά τη δημιουργία των διαδρομών απομόνωσης (Isolation Routing), η διάμετρος του εργαλείου ορίστηκε στα 0,1 mm, ενώ για το Geometry Object το βάθος κοπής (Cut Z) καθορίστηκε στα 0,3 mm. Για την προετοιμασία των σπών χρησιμοποιήθηκε το αρχείο Excellon, με διάμετρο τρυπανιού 0,7 mm και βάθος διάτρησης στα 0,8 mm. Τέλος, για την κοπή του περιγράμματος, επιλέχθηκε ένα Endmill διαμέτρου 2 mm με βάθος κοπής στα 0,8 mm. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν στις προκαθορισμένες τιμές (default) του λογισμικού, καθώς κρίθηκαν επαρκείς για τη διασφάλιση της σταθερότητας της κατεργασίας και την αποφυγή περιττών καταπονήσεων στα εργαλεία κοπής.

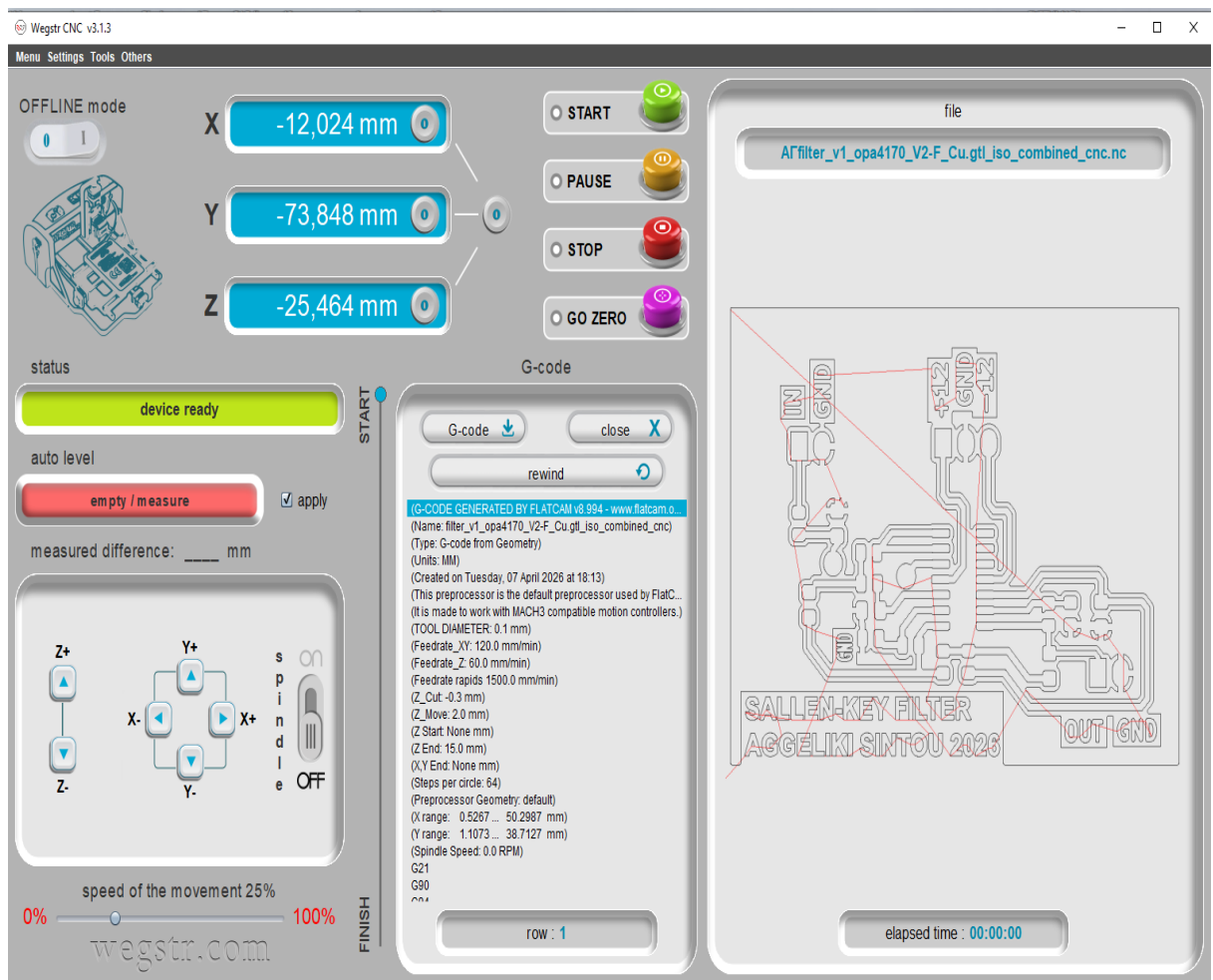
Λόγω της ενσωμάτωσης του τελεστικού ενισχυτή OPA4170, ο οποίος απαιτεί ιδιαίτερα λεπτές διαδρομές χαλκού, η χάραξη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός εργαλείου V-bit 0,1 mm / 30°. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στην ικανότητα της μηχανής CNC Wegstr να διαχειρίζεται το συγκεκριμένο εργαλείο με υψηλή επαναληψιμότητα, επιτυγχάνοντας την απομόνωση του χαλκού με ακρίβεια 0,1 mm. Η οξεία γωνία των 30° επιλέχθηκε για τη μέγιστη δυνατή λεπτομέρεια στη χάραξη, ενώ το σχήμα V του εργαλείου διευκολύνει την αποτελεσματική απομάκρυνση των ρινισμάτων κατά τη διαδικασία της κοπής, διασφαλίζοντας την καθαρότητα των διαδρομών.



Εικόνα 107: Το αντικείμενο CNC Job Object που περιέχει τον G-Code όπου οι γεωμετρίες μετατρέπονται σε συγκεκριμένες οδηγίες για τη μηχανή CNC Wegstr.

Τα αρχεία G-Code αποτελούν τη γλώσσα επικοινωνίας με τον ελεγκτή της μηχανής CNC Wegstr, μεταφράζοντας τη γεωμετρία του σχεδίου, τις γραμμές και τους κύκλους, σε συγκεκριμένες εντολές κίνησης, όπως η G0 για ταχεία μετακίνηση, η G1 για γραμμική παρεμβολή και οι G2/G3 για κυκλική παρεμβολή. Παράλληλα, η χρήση αυτών των αρχείων επιτρέπει την πλήρη οπτική προσομοίωση της κατεργασίας. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η προεπισκόπηση των διαδρομών των εργαλείων, από τη χάραξη και τη διάτρηση έως την τελική κοπή του περιγράμματος, συμπεριλαμβανομένων των κινήσεων των εργαλείων "στον αέρα" διασφαλίζοντας έτσι την αποφυγή σφαλμάτων πριν την έναρξη της παραγωγής.

Ακολουθεί η ρύθμιση του φυσικού περιβάλλοντος της μηχανής Wegstr CNC. Αφού στερεωθεί η πλακέτα χαλκού (FR4) στην επιφάνεια εργασίας της μηχανής, τοποθετείται το εργαλείο για τη χάραξη των διαδρομών. Το λογισμικό της μηχανής Wegstr CNC, είναι το κέντρο ελέγχου που συνδέει τον υπολογιστή με τη μηχανή, επιτρέποντας στο χρήστη να παρακολουθεί τις συντεταγμένες, να φορτώνει αρχεία G-Code και να ελέγχει την κίνηση των αξόνων σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 108: Κεντρικό στιγμιότυπο από το λογισμικό της μηχανής Wegstr CNC κατά την προετοιμασία για την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος (PCB).

Η πράσινη ένδειξη, device ready, στην Εικόνα 108 υποδεικνύει ότι η μηχανή είναι συνδεδεμένη και έτοιμη για λειτουργία. Στο επάνω μέρος ορίστηκαν χειροκίνητα οι θέσεις των αξόνων X,Y,Z σε χιλιοστά. Έτσι ο χειριστής γνωρίζει ακριβώς που βρίσκεται το εργαλείο σε σχέση με το μηδενικό σημείο. Στο κεντρικό παράθυρο φαίνεται ο κώδικας που παράχθηκε από το FlatCAM. Λόγω του μεγάλου όγκου του αρχείου G-code με το όνομα filter_v1_opa4170_V2-F_Cu.gtl_iso_combined_cnc.nc που φορτώθηκε στο λογισμικό ελέγχου Wegstr CNC στο **Παράρτημα Α** καταχωρούνται ενδεικτικά οι δύο πρώτες σελίδες του αναλυτικού κώδικα.

Οι πιο σημαντικές τεχνικές λεπτομέρειες είναι:

- ❖ Η διάμετρος του εργαλείου (Tool Diameter 0,1 mm): Χρησιμοποιήθηκε ένα πολύ λεπτό εργαλείο, ιδανικό για την απομόνωση των διαδρομών ενός τυπωμένου κυκλώματος (PCB).
- ❖ Feedrate XY (120mm/min): Η ταχύτητα κίνησης της ατράκτου κατά την κοπή.
- ❖ Z-Cut (-0.3 mm): Το βάθος στο οποίο θα εισχωρήσει το εργαλείο στο χαλκό της πλακέτας.

Στα δεξιά εμφανίζεται η προεπισκόπηση της διαδρομής του εργαλείου. Διακρίνονται καθαρά οι θέσεις για τα εξαρτήματα, οι διάδρομοι χαλκού και οι επιγραφές. Το κουμπί, empty/measure, κάτω από την ένδειξη auto level είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της μηχανής Wegstr CNC. Επιτρέπει στη μηχανή να μετρήσει την επιφάνεια του PCB πριν το φρεζάρισμα και την κοπή του περιγράμματος. Επειδή καμία πλακέτα δεν είναι απόλυτα επίπεδη, το λογισμικό διορθώνει αυτόματα το βάθος κοπής (Z) σε κάθε σημείο, διασφαλίζοντας ομοιόμορφο αποτέλεσμα χωρίς να καταστρέφεται ο χαλκός. Η ίδια η μύτη του εργαλείου και η επιφάνεια του χαλκού λειτουργούν ως

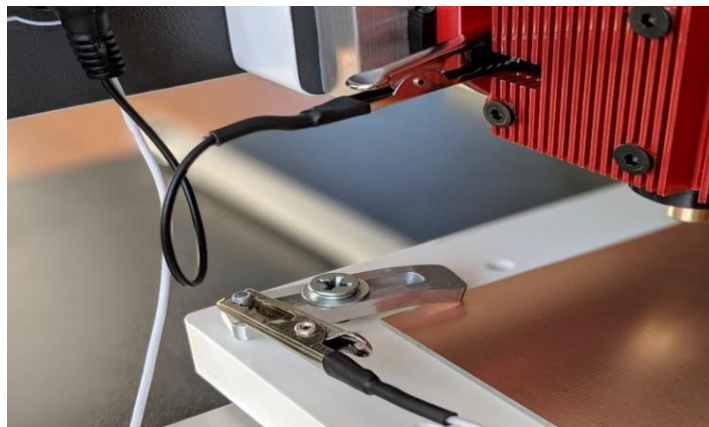
ένας ηλεκτρικός διακόπτης. Όταν η μύτη ακουμπήσει την πλακέτα, το κύκλωμα κλείνει και η μηχανή καταγράφει το ακριβές ύψος.

Στο κάτω μέρος της Εικόνα 108 υπάρχουν τα βέλη για τη χειροκίνητη μετακίνηση της ατράκτου. Το ρυθμιστικό, speed of the movement, επιτρέπει στο εργαλείο να προσεγγίσει με ασφάλεια την πλακέτα πριν ξεκινήσει η αυτόματη διαδικασία, Auto Leveling. Λόγω του πολύ εύθραυστου εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για να αποφευχθεί το σπάσιμο της ακίδας ορίστηκε η ταχύτητα κίνησης του εργαλείου σε 25 %. Με το πάτημα του κουμπιού, empty measure, το εργαλείο κινείται σε διάφορα σημεία πάνω στην επιφάνεια της πλακέτας και παίρνει μετρήσεις.

Στο πεδίο, measured difference, το λογισμικό εμφανίζει τη διακύμανση του ύψους. Όταν η επιλογή, apply, είναι τσεκαρισμένη, το λογισμικό τροποποιεί αυτόματα τον G-Code κατά την εκτέλεση. Αν π.χ. η πλακέτα είναι ελαφρώς ανασηκωμένη σε μια γωνία, ο άξονας θα σηκωθεί ανάλογα σε εκείνο το σημείο, ώστε το βάθος κοπής (Cut Z) να παραμείνει σταθερό παντού.

Για να λειτουργήσει η διαδικασία, Auto Leveling, στη μηχανή Wegstr CNC, απαιτείται μια απλή αλλά σημαντική ηλεκτρική συνδεσμολογία, η οποία μετατρέπει το εργαλείο σε αισθητήρα (probe). Το άσπρο καλώδιο με κροκοδειλάκι (Clip), συνδέεται στον σφιγκτήρα αλουμινίου (βλ. Εικόνα 109). Η μηχανή Wegstr CNC διαθέτει τέσσερις σφιγκτήρες αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για την συγκράτηση του τεμαχίου εργασίας στην πλατφόρμα της μηχανής. Περιλαμβάνονται βίδες και ροδέλες για τη στερέωση των σφιγκτήρων στην επιφάνεια εργασίας. Ο άλλος πόλος είναι η ίδια μύτη του εργαλείου, η οποία είναι γειωμένη μέσω του άξονα της μηχανής. Μόλις η μύτη ακουμπήσει την επιφάνεια του χαλκού, το κύκλωμα κλείνει. Η μηχανή το αντιλαμβάνεται ακαριαία και καταγράφει την ακριβή τιμή του άξονα Z σε εκείνο το σημείο. Αφού καθαριστούν η μύτη του εργαλείου και η πλακέτα από σκόνη ή γρέζια, ώστε να υπάρχει καλή ηλεκτρική επαφή, το λογισμικό «διαβάζει» τις διαστάσεις από το G-Code (στο παράθυρο δεξιά) και ορίζει αυτόματα τα όρια της μέτρησης. Πατώντας το κουμπί, empty/measure, ο κινητήρας της ατράκτου αρχίζει να κινείται σε ένα πλέγμα σημείων (π.χ. 3x3 ή 5x5) πάνω στην πλακέτα. Σε κάθε σημείο, ο κινητήρας της ατράκτου κατεβαίνει αργά μέχρι να κάνει επαφή. Πρέπει οπωσδήποτε να είναι ενεργοποιημένο το κουτάκι “apply” για να αποθηκεύονται στη μνήμη του προγράμματος οι διαφορές στο ύψος. Αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση, εμφανίζεται η τιμή στο measured difference (π.χ. 9 mm). Τότε, κατά τη διάρκεια της χάραξης, η μηχανή θα προσθέτει ή θα αφαιρεί αυτόματα αυτά τα δέκατα του χιλιοστού στο ύψος Z, ακολουθώντας τις καμπύλες της πλακέτας.

Για ασφάλεια είναι σημαντική η αφαίρεση του καλωδίου με το κροκοδειλάκι από την πλακέτα, πριν ξεκινήσει το Spindle, το μοτέρ που περιστρέφει το εργαλείο, για να αποφευχθεί τυχόν μπέρδεμα των καλωδίων.



Εικόνα 109: Απλή ηλεκτρική συνδεσμολογία που μετατρέπει ολόκληρη την επιφάνεια της πλακέτας σε έναν ηλεκτρικό πόλο.

Για να μπορέσει η Wegstr CNC να εκτελέσει το Auto Leveling και μετά τη χάραξη, πρέπει πρώτα να γνωρίζει που ακριβώς ξεκινά η πλακέτα. Αυτό είναι το Σημείο Μηδέν (Zero Point). Χρησιμοποιώντας τα βέλη που βρίσκονται κάτω αριστερά στην Εικόνα 108 για να μεταφερθεί η μύτη του εργαλείου πάνω από την κάτω αριστερή γωνία της πλακέτας. Μόλις το εργαλείο ευθυγραμμιστεί με τη γωνία, πατώντας τα εικονίδια με το στόχαστρο δίπλα από τις ενδείξεις X και Y στο πάνω μέρος της οθόνης, οι τιμές θα γίνουν 0,000 mm. Έτσι ορίστηκαν τα X και Y (Οριζόντιο Μηδέν). Αυτό διασφαλίζει ότι η διαδικασία κατεργασίας της πλακέτας θα ξεκινήσει από εκεί που ορίστηκαν οι επιθυμητές συντεταγμένες.

Ο ορισμός του Z (Κάθετο Μηδέν), είναι πιο ευαίσθητο βήμα, καθώς η μύτη του εργαλείου πρέπει να αγγίξει το χαλκό χωρίς να σπάσει. Στο λογισμικό της μηχανής Wegstr CNC υπάρχει λειτουργία που κατεβάζει αργά τον άξονα Z μέχρι το εργαλείο να ακουμπήσει την πλακέτα και να κλείσει το κύκλωμα. Μόλις γίνει η επαφή, η τιμή του Z μηδενίζεται αυτόματα. Έτσι η μηχανή «ξέρει» ότι η επιφάνεια του χαλκού είναι το σημείο μηδέν και κάθε κίνηση σε αρνητικές τιμές (π.χ. Z_Cut -0.3 mm) θα σημαίνει χάραξη μέσα στο χαλκό.

Στην Εικόνα 108 το μωβ κουμπί "GO ZERO" μεταφέρει ανά πάσα στιγμή τον κινητήρα της ατράκτου στο αρχικό σημείο που ορίστηκε χειροκίνητα. Ο σωστός μηδενισμός είναι η βάση για να δουλέψει σωστά το Auto Leveling, καθώς όλες οι μετρήσεις ύψους που έγιναν, θα συγκριθούν με αυτό το αρχικό "Μηδέν".

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω ρυθμίσεων, η μηχανή ξεκινά τη φυσική διαδικασία κατασκευής της πλακέτας (PCB) μέσω μηχανικής αφαίρεσης υλικού (milling). Η διαδικασία που ακολουθεί η μηχανή περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- ✓ **Βαθμονόμηση και Auto Leveling:** Η κεφαλή «ψηλαφίζει» την επιφάνεια της πλακέτας σε διάφορα σημεία. Αυτό είναι σημαντικό αφού οι πλακέτες δεν είναι ποτέ τέλεια επίπεδες. Η μηχανή Wegstr CNC αποθηκεύει αυτές τις μικροδιαφορές στο ύψος για να εξασφαλίσει ότι το βάθος χάραξης θα είναι ομοιόμορφο παντού.
- ✓ **Χάραξη Μόνωσης (Isolation Milling):** Η μηχανή χρησιμοποιεί ένα λεπτό εργαλείο χάραξης (engraving bit), για να αφαιρέσει μια λεπτή λωρίδα χαλκού γύρω από τις διαδρομές του κυκλώματος. Με αυτόν τον τρόπο «απομονώνει» ηλεκτρικά τις χάλκινες γραμμές από την υπόλοιπη επιφάνεια, για να δημιουργηθούν οι διαδρομές (traces) που θα μεταφέρουν το ρεύμα.
- ✓ **Διάτρηση (Drilling):** Αφού ολοκληρωθεί η χάραξη, η μηχανή αλλάζει λειτουργία και εμφανίζει μήνυμα για αλλαγή του εργαλείου και τοποθέτηση τρυπανιού, για να γίνει η διάτρηση των οπών, για να μπουν τα «ποδαράκια» των εξαρτημάτων και των νίπας που δεν προορίζονται για εξαρτήματα, αλλά λειτουργούν ως «γέφυρες» για να μεταφέρουν το ηλεκτρικό σήμα από την πάνω πλευρά του χαλκού στην κάτω σε πλακέτα δύο όψεων.
- ✓ **Κοπή Περιγράμματος (Board Cut-Out):** Στο τελικό στάδιο, χρησιμοποιείται ένα μεγαλύτερο κοπτικό (endmill 2.0 mm ή 3.0mm), γι' αυτό η μηχανή αλλάζει πάλι λειτουργία και εμφανίζει μήνυμα για αλλαγή του κοπτικού εργαλείου και τοποθέτηση του κατάλληλου. Κόβει την πλακέτα στο τελικό της σχήμα και μέγεθος, αποκόπτοντας την από την αρχική.

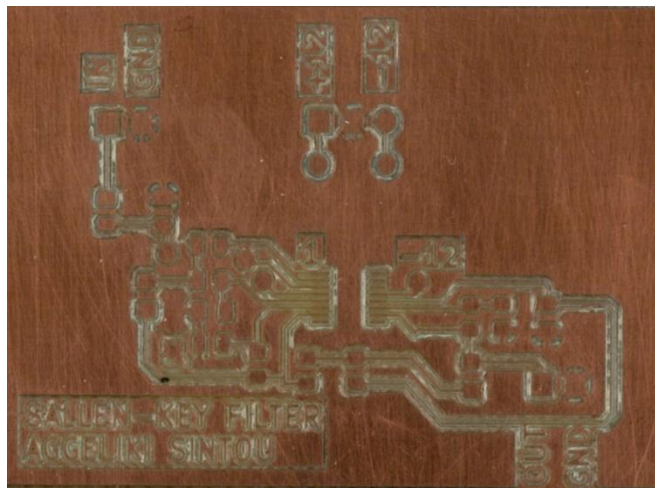
Η χρήση της μηχανής CNC Wegstr για την κατασκευή PCB προσφέρει μια ταχεία, καθαρή και υψηλής ακρίβειας εναλλακτική στις παραδοσιακές χημικές μεθόδους χάραξης. Μέσω της διαδικασίας της μηχανικής αφαίρεσης (milling), επιτυγχάνεται απόλυτος έλεγχος στις διαδρομές του κυκλώματος, ενώ η δυνατότητα αυτόματης ισοστάθμισης (Auto Leveling) εγγυάται επαγγελματικό αποτέλεσμα ακόμα και σε πολύ λεπτά κυκλώματα.

Η ολοκλήρωση των σταδίων χάραξης, διάτρησης και κοπής σε μια ενιαία ροή εργασίας, επιτρέπει στον δημιουργό να μεταβεί από το ψηφιακό σχέδιο στην έτοιμη προς συναρμολόγηση πλακέτα μέσα σε λίγο χρόνο, καθιστώντας την ιδανική λύση για εργαστηριακή έρευνα και ανάπτυξη νέων ηλεκτρονικών προϊόντων.

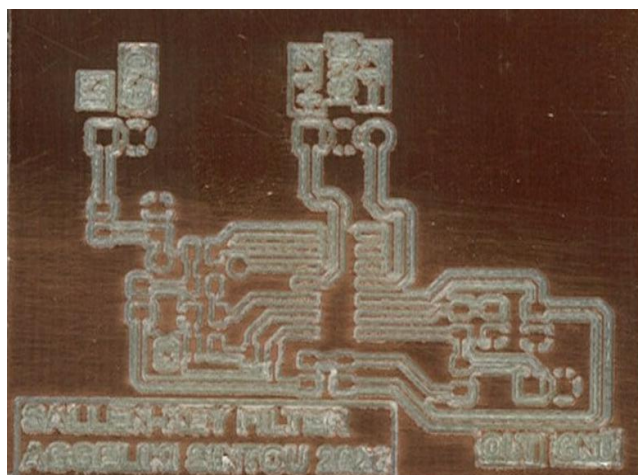
Επιπλέον, η χρήση της μηχανής CNC Wegstr υπερτερεί σημαντικά, καθώς εξαλείφει την ανάγκη για επικίνδυνα χημικά διαλύματα, όπως ο χλωριούχος σίδηρος, που απατούνται κατά τη της χημική χάραξη. Αυτό καθιστά τη μηχανή CNC Wegstr την πλέον φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για εργαστηριακούς χώρους και σχολεία, αφού προσφέρει ένα καθαρό περιβάλλον εργασίας χωρίς οσμές και τοξικά απόβλητα.

Συνοψίζοντας, η ταχύτητα μετάβασης από το σχέδιο στην υλοποίηση, σε συνδυασμό με την υψηλή επαναληψιμότητα και την οικολογική προσέγγιση, καθιστούν την εργαλειομηχανή CNC Wegstr ένα απαραίτητο εργαλείο για τον σύγχρονο ηλεκτρονικό μηχανικό και τον σύγχρονο ερευνητή.

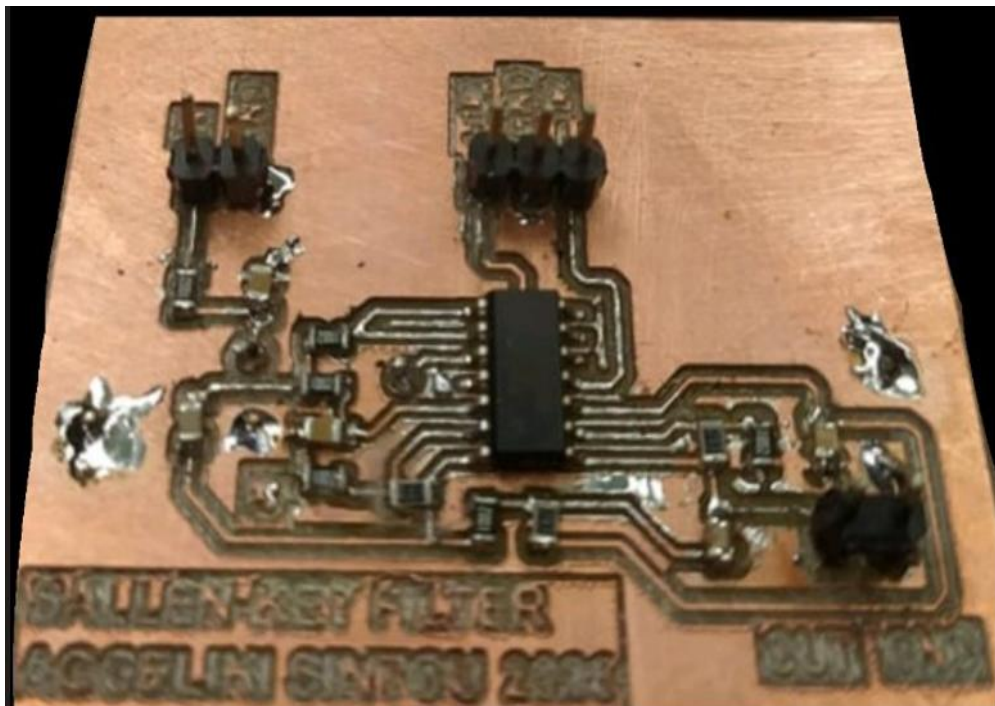
Στην Εικόνα 110 και στην Εικόνα 111, αναδεικνύεται το τελικό αποτέλεσμα της υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας του μηχανήματος CNC Wegstr, προσφέροντας καθαρό διαχωρισμό στα pads των εξαρτημάτων και πεντακάθαρη αποτύπωση των κειμένων, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο ιδανική για την ταχεία πρωτοτυποποίηση κυκλωμάτων υψηλής ανάλυσης.



Εικόνα 110: Μηχανική χάραξη με το φρεζάκι καρβιδίου υψηλής ανάλυσης V-bit διαμέτρου 0,1 mm.



Εικόνα 111: Μηχανική χάραξη με το φρεζάκι καρβιδίου υψηλής ανάλυσης V-bit διαμέτρου 0.2 mm.



Εικόνα 112: Πρωτοτυποποίηση PCB υψηλής ακρίβειας μέσω Wegstr Milling Machine.

Στην Εικόνα 112 παρουσιάζεται η επιτυχής ολοκλήρωση της διαδικασίας χωρίς τη δημιουργία βραχυκυκλωμάτων ανάμεσα στις λεπτές αγωγίμες διαδρομές, επιβεβαιώνοντας την υψηλή ακρίβεια, την ευκρίνεια και την κατασκευαστική πιστότητα των pads από τη μηχανή Wegstr.

5.2 Αντιμετώπιση Προβλημάτων Κατά το Επιτραπέζιο Φρεζάρισμα

Οι προκλήσεις που προκύπτουν κατά το επιτραπέζιο φρεζάρισμα συνδέονται με:

✚ Τις λανθασμένες ρυθμίσεις στο φρεζάρισμα που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα: Υπερβολικά υψηλές τιμές σε παραμέτρους όπως ο ρυθμός πρόωσης, η ταχύτητα της ατράκτου (στροφές) και το βάθος κοπής, έχουν επιπτώσεις στην αυξημένη την τραχύτητα και την εμφάνιση ανεπιθύμητων σημαδιών, όπως χαρακιές στο υλικό.

✚ Την φθορά του κοπτικού εργαλείου που επηρεάζει την ποιότητα της εργασίας: Με την συνεχή χρήση, οι κόψεις του εργαλείου «στομώνουν», χάνουν την αιχμηρότητα τους. Ένα φθαρμένο εργαλείο χάνει την ικανότητα του να κόβει καθαρά, με άμεση συνέπεια τη μείωση της ακρίβειας στην κατεργασία του υλικού.

✚ Τη σωστή στερέωση του υλικού στη μηχανή: Αν το τεμάχιο δεν είναι καλά στερεωμένο, οι δυνάμεις της κατεργασίας προκαλούν μετατοπίσεις. Οι σφιγκτήρες αλουμινίου (clamps), πρέπει μετά το σφίξιμο να μην κουνιούνται. Αν κουνιούνται το τεμάχιο δεν πατάει καλά στην πλατφόρμα της φρέζας.

5.3 Γενικές Πληροφορίες για το Μηχάνημα CNC Wegstr

Ακολουθεί γνωστοποίηση διαφόρων συμβουλών και πληροφοριών που προορίζονται για τη σωστή λειτουργία του μηχανήματος. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα παρακολουθείται ηλεκτρονικά. Εάν υπάρξει υπερβολικό φρενάρισμα, ο υπερφορτωμένος άξονας θα αποσυνδεθεί, γεγονός που θα σταματήσει ολόκληρο το μηχάνημα. Αυτή η κατάσταση υποδεικνύεται από το συνεχές άναμμα της μπλε διόδου LED ελέγχου. Για την επανεκκίνηση του μηχανήματος, πρέπει να πατηθεί το κουμπί START.

Το εργαλείο φρεζαρίσματος συγκρατείται από μια μικρή οριζόντια βίδα με σπείρωμα M3. Χρησιμοποιούνται μόνο εργαλεία φρεζαρίσματος με διάμετρο στελέχους 3,175 mm. Να γίνεται προσπάθεια τοποθέτησης του εργαλείου φρεζαρίσματος εσωτερικά στον άξονα όσο το δυνατόν πιο βαθιά, μόνο ένα μέρος που είναι απαραίτητο για το φρεζάρισμα θα πρέπει να είναι ορατό. Η μεγάλη προεξοχή του εργαλείου, μπορεί να προκαλέσει ανακρίβεια στο φρεζάρισμα.

Εάν το εργαλείο φρεζαρίσματος αφήνει γρέζια κατά το φρεζάρισμα, το εργαλείο φρεζαρίσματος να περιστρέφεται, αφού λυθεί και χαλαρώσει λίγο μέσα στον άξονα σε άλλη θέση.

Προσοχή όταν γίνεται κοπή στις ακραίες θέσεις των αξόνων, καθώς μπορεί να προκληθεί ζημιά στο μηχάνημα. Είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση μόνο καλής ποιότητας και αιχμηρών εργαλείων φρεζαρίσματος για να επιτευχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Μετά την εγκατάσταση και αφού είναι σε θέση λειτουργίας το μηχάνημα, συνίσταται η επιπεδοποίηση (surfacing). Πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία το μηχάνημα CNC κάνει την επιφάνεια εργασίας απόλυτα επίπεδη σε σχέση με την κίνηση των αξόνων του. Είναι σημαντική διαδικασία, ειδικά για την κατασκευή πλακετών (PCB), καθώς εξασφαλίζει ότι το βάθος κοπής θα παραμείνει σταθερό σε όλη την επιφάνεια του υλικού. Η διαδικασία γίνεται κυρίως μέσω της λειτουργίας Auto Level που περιλαμβάνεται στο λογισμικό ελέγχου της Wegstr. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια εργασίας της μηχανής επιδέχεται περιοδική συντήρηση μέσω ελαφρύ φρεζαρίσματος (της τάξεως των δεκάτων του χιλιοστού), διασφαλίζοντας την επιπεδότητα και την ποιότητα των παραγόμενων PCB.

Για την στερέωση του κατεργασμένου υλικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σφιγκτήρες αλουμινίου βαρέως τύπου (μέρος της συσκευασίας) ή ταινία διπλής όψεως ή εποξική κόλλα δύο συστατικών των 5 λεπτών κ.λπ. Για χειροκίνητη και λεπτή ρύθμιση της τρέχουσας θέσης του τραπεζιού εργασίας ή του άξονα, επιβάλλεται η περιστροφή του λευκού κουμπιού στον επιλεγμένο άξονα προς την επιθυμητή κατεύθυνση (βλ Εικόνα 113).

Να ακολουθούνται οι οδηγίες σχετικά με τα μέτρα ασφαλείας που πρέπει να λαμβάνει ο χρήστης, συμπεριλαμβανομένου οποιουδήποτε ατομικού προστατευτικού εξοπλισμού, ο οποίος πρέπει να παρέχεται, ο χειριστής πρέπει να χρησιμοποιεί γάντια, γυαλιά ή μάσκα προσώπου κατά τη λειτουργία του μηχανήματος.

Προσοχή στις οδηγίες, για τις συνθήκες υπό τις οποίες το μηχάνημα πληροί τις απαιτήσεις σταθερότητας κατά τη χρήση, τη μεταφορά, τη συναρμολόγηση, την αποσυναρμολόγηση, όταν είναι εκτός λειτουργίας, όταν βρίσκεται σε δοκιμή ή σε προβλέψιμες βλάβες. Η κατανομή του βάρους του μηχανήματος παρέχει επαρκή σταθερότητα έναντι ανατροπής. Το μηχάνημα πρέπει να τοποθετείται σε σταθερή επιφάνεια.

Για τον χειριστή είναι επίσης σημαντικές οι οδηγίες για τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται σε περίπτωση ατυχήματος ή βλάβης, σε περίπτωση μπλοκαρισμένου μηχανήματος, ή για τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται για το ασφαλές ξεκλείδωμα του μηχανήματος. Η απενεργοποίηση της συσκευής γίνεται χρησιμοποιώντας το κύριο κουμπί ή το κουμπί έκτακτης ανάγκης STOP. Ακολουθεί η αποσύνδεση της συσκευής από την παροχή ρεύματος και η ακολουθία των οδηγιών του κατασκευαστή.



Εικόνα 113: Χειροκίνητη ρύθμιση του άξονα Z στη μηχανή Wegstr CNC μέσω του περιστρεφόμενου κομβίου (λευκό κουμπί).

5.4 Οδηγίες για Ασφαλή Ρύθμιση και Συντήρηση της Φρέζας CNC Wegstr

Σημαντικά βήματα που πρέπει να ακολουθούνται πριν από την εκκίνηση λειτουργίας της μηχανής συμπεριλαμβανομένων των προστατευτικών μέτρων που πρέπει να λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των εργασιών είναι:

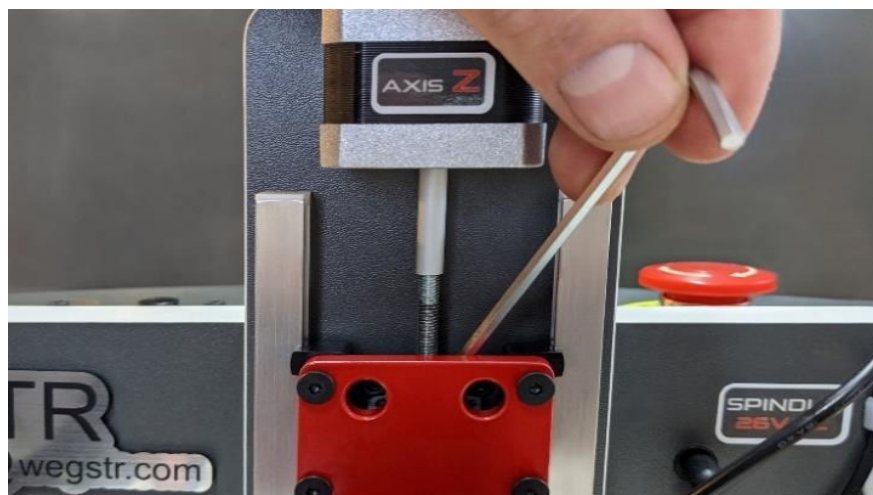
Πριν από την εκκίνηση λειτουργίας στη μηχανή είναι απαραίτητη η απενεργοποίηση του μηχανήματος, χρησιμοποιώντας το κύριο κουμπί ή το κουμπί έκτακτης ανάγκης STOP, η αποσύνδεση της συσκευής από την παροχή ρεύματος, ο καθαρισμός του μηχανήματος από λιπαντικά, λάδια κ.λπ. και αν το μηχάνημα έχει κομμένα ή τρυπημένα τμήματα, να καλύπτονται.

Η τακτική και σωστή συντήρηση καθώς και η συνεπής διατήρηση της καθαριότητας στον χώρο εργασίας είναι αναπόφευκτη για λόγους ασφαλείας! Η επικοινωνία με το εξουσιοδοτημένο σέρβις και η ζήτηση γνήσιων ανταλλακτικών είναι επιβεβλημένη, ενώ η μη συμμόρφωση με τα παραπάνω μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια του μηχανήματος.

Κατά την αντικατάσταση εξαρτημάτων και άλλων αντικειμένων, να παρέχονται εξαρτήματα ίδιου τύπου ή να πληρούν τα πρότυπα. Η χρήση μη γνήσιων εξαρτημάτων ή η παραμέληση της τακτικής συντήρησης μπορεί να προκαλέσει ζημιά στη συσκευή και απώλεια της εγγύησης. Η αποσύνδεση του μηχανήματος να γίνεται σύμφωνα με το εγχειρίδιο οδηγιών και να εξασφαλίζεται η απροσδόκητη επανεκκίνηση.

Πριν από την έναρξη λειτουργίας του μηχανήματος πρέπει να λαμβάνονται οι εξής προφυλάξεις:

- Έλεγχος του μηχανήματος αν είναι εξοπλισμένο με όλα τα καλύμματα.
- Έλεγχος των λειτουργιών ασφαλείας όλων των στοιχείων.
- Έλεγχος των μέτρων ασφαλείας.
- Τα συνιστώμενα βήματα ρύθμισης και συντήρησης που πρέπει να ακολουθούνται είναι:
- Ολόκληρος ο χώρος εργασίας πρέπει να διατηρείται καθαρός για την αποφυγή ζημιών στα κινούμενα μέρη λόγω της επίδρασης της βρωμιάς.
- Περιστασιακή λίπανση των ραγών κίνησης και των ράβδων βιδών με λιπαντικό.
- Σε περίπτωση οπισθοδρόμησης ή υπερβολικής σύσφιξης κάποιου άξονα, είναι δυνατό να ρυθμιστεί αυτό χαλαρώνοντας ή σφίγγοντας δύο βίδες κάτω από κάθε άξονα (βλ Εικόνα 114).



Εικόνα 114: Ρύθμιση του άξονα Z.

Σύμφωνα με τη λίστα και τον κατάλογο των προτεινόμενων ανταλλακτικών, η λάθος χρήση των ανταλλακτικών θεωρείται ως αδικαιολόγητη παρέμβαση στην κατασκευή του μηχανήματος και επομένως ο κατασκευαστής δεν αναλαμβάνει καμιά ευθύνη για την τροποποιημένη κατασκευή. Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται μόνο ανταλλακτικά που συμμορφώνονται με τις δηλωμένες απαιτήσεις του κατασκευαστή. Οι μη επαγγελματικές επισκευές καθώς και η χρήση λανθασμένων ανταλλακτικών οδηγούν σε απώλεια της εγγύησης του προϊόντος.

Η εγκατάσταση, η σύνδεση, η θέση σε λειτουργία καθώς και η συντήρηση και οι επισκευές πρέπει να εκτελούνται μόνο από εξειδικευμένο και εκπαιδευμένο προσωπικό. Η χρήση του μηχανήματος με οποιονδήποτε τρόπο διαφορετικό από αυτόν που συνιστά ο κατασκευαστής είναι ακατάλληλη! Αυτό το μηχάνημα πρέπει να λειτουργεί μόνο υπό την επίβλεψη ατόμων που γνωρίζουν καλά τις ιδιότητες αυτής της συσκευής και έχουν ενημερωθεί για τους απαιτούμενους κανονισμούς. Οποιοσδήποτε άλλες αλλαγές και μη εξουσιοδοτημένες τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται σε αυτό το μηχάνημα χωρίς την άδεια του κατασκευαστή, στερούν τον κατασκευαστή από κάθε ευθύνη για επακόλουθες ζημιές ή τραυματισμούς! Εάν ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει αυτήν τη συσκευή για οποιονδήποτε άλλο σκοπό που δεν αναφέρεται ως τυπική χρήση ή εμπίπτει σε απαγορευμένες ενέργειες, τότε πρέπει να συζητήσει αυτήν την ενέργεια με τον

κατασκευαστή. Για την αποφυγή τυχόν επικίνδυνων καταστάσεων ή τραυματισμών του χρήστη ή ατόμων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση κατά την εργασία με αυτήν τη συσκευή να ακολουθούνται πιστά οι οδηγίες ασφαλείας.

5.5 Μελλοντικές Εργασίες

Φθάνοντας στο τέλος της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνεται ότι η ενσωμάτωση επιτραπέζιων συστημάτων CNC, όπως η Wegstr, στην παραγωγική αλυσίδα του εργαστηρίου, προσφέρει μια εξαιρετικά αποδοτική λύση για την ταχεία πρωτοτυποποίηση ηλεκτρονικών. Η κύρια ερευνητική συνεισφορά εντοπίζεται στην τεκμηρίωση μιας πλήρους και επαναλήψιμης ροής εργασίας, η οποία γεφυρώνει το κενό ανάμεσα στον ψηφιακό σχεδιασμό και την υλική υλοποίηση. Η επιτυχής κατασκευή και λειτουργία του βαθυπερατού φίλτρου Butterworth αποδεικνύει έμπρακτα ότι η ακρίβεια της μηχανικής κατεργασίας CNC μπορεί να υποστηρίξει απαιτητικές ηλεκτρονικές εφαρμογές, προσφέροντας στην ερευνητική κοινότητα μια αξιόπιστη μεθοδολογία για την ανάπτυξη πρότυπων συστημάτων με χαμηλό κόστος και υψηλή ταχύτητα υλοποίησης.

Παράλληλα, η παρούσα μελέτη ανοίγει νέους δρόμους για περαιτέρω διερεύνηση. Στις μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνεται η δοκιμή της μεθοδολογίας σε πολυστρωματικά (multilayer) PCB, όπου οι απαιτήσεις ευθυγράμμισης και ακρίβειας είναι ακόμη υψηλότερες. Επίσης, ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωμάτωση αλγορίθμων βελτιστοποίησης της διαδρομής του εργαλείου (toolpath optimization) για τη μείωση του χρόνου παραγωγής, καθώς και η δοκιμή νέων σύνθετων υλικών υποστρώματος. Η περαιτέρω αξιοποίηση του εξοπλισμού του εργαστηρίου Συστημάτων VLSI και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (VCAS), προς αυτές τις κατευθύνσεις, αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά τη δυνατότητα παραγωγής εξειδικευμένων μικροηλεκτρονικών συστημάτων υψηλής πολυπλοκότητας.

5.6 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [5.1] AT-Machining. (χ.χ.). Τα πάντα για τη σύνθετη κατεργασία CNC. Ανακτήθηκε στις [5 Απριλίου 2026], από <https://at-machining.com/el/everything-about-complex-cnc-machining/>
- [5.2] EasyEDA. (2020, Ιούνιος 14). EasyEDA Tutorial (v6.3.53). Ανακτήθηκε από lceda.cn
- [5.3] Εργαστήριο VCAS. (χ.χ.). Αρχική Σελίδα. Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Ανακτήθηκε στις (5 Απριλίου 2026), από <https://vcas.cs.uoi.gr/el/home/>
- [5.4] FlatCAM. (χ.χ.). FlatCAM Manual. Ανακτήθηκε στις (5 Απριλίου 2026), από <http://flatcam.org/manual/index.html>
- [5.5] STYLECNC. (χ.η.). Τι είναι η κατεργασία CNC;. STYLECNC. Ανακτήθηκε 20 Απριλίου 2026 από <https://el.stylecnc.com/blog/cnc-machining.html>
- [5.6] Texas Instruments. (2018). OPAx170 36-V, Single-Supply, SOT553, Low-Power Operational Amplifiers Value Line Series (SBOS557E). Ανακτήθηκε από ti.com
- [5.7] Wegstr s.r.o. (2022). Instruction Manual: CNC Milling Machine Type Wegstr. Ανακτήθηκε από wegstr.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

(G-CODE GENERATED BY FLATCAM v8.994 - www.flatcam.org - Version Date: 2020/11/7)

(Name: filter_v1_opa4990-F_Cu.gbr_iso_combined_cnc)

(Type: G-code from Geometry)

(Units: MM)

(Created on Tuesday, 31 March 2026 at 10:48)

(This preprocessor is the default preprocessor used by FlatCAM.)

(It is made to work with MACH3 compatible motion controllers.)

(TOOL DIAMETER: 0.15 mm)

(Feedrate_XY: 120.0 mm/min)

(Feedrate_Z: 60.0 mm/min)

(Feedrate rapids 1500.0 mm/min)

(Z_Cut: -0.5 mm)

(Z_Move: 2.0 mm)

(Z Start: None mm)

(Z End: 15.0 mm)

(X,Y End: None mm)

(Steps per circle: 64)

(Preprocessor Geometry: default)

(X range: 0.1207 ... 50.9841 mm)

(Y range: 1.1331 ... 35.9437 mm)

(Spindle Speed: 0.0 RPM)

G21

G90

G94

G01 F120.00

M5

G00 Z15.0000

G00 X0.0000 Y0.0000

T2

M6

(MSG, Change to Tool Dia = 0.1500)

M0

G00 Z15.0000

M03

G01 F120.00

G00 X0.1224 Y1.3162

G01 F60.00

G01 Z-0.5000

G01 F120.00

G01 X0.1345 Y1.2610
 G01 X0.1375 Y1.2521
 G01 X0.1416 Y1.2437
 G01 X0.1456 Y1.2374
 G01 X0.1502 Y1.2315
 G01 X0.1960 Y1.1787
 G01 X0.2011 Y1.1733
 G01 X0.2068 Y1.1684
 G01 X0.2129 Y1.1642
 G01 X0.2194 Y1.1606
 G01 X0.2280 Y1.1570
 G01 X0.3003 Y1.1357
 G01 X0.3108 Y1.1336
 G01 X0.3197 Y1.1331
 G01 X39.2518 Y1.1331
 G01 X39.2589 Y1.1334
 G01 X39.2660 Y1.1345
 G01 X39.3211 Y1.1464
 G01 X39.3283 Y1.1486
 G01 X39.3335 Y1.1506
 G01 X39.3434 Y1.1559
 G01 X39.3524 Y1.1626
 G01 X39.4093 Y1.2122
 G01 X39.4143 Y1.2177
 G01 X39.4197 Y1.2253
 G01 X39.4241 Y1.2335
 G01 X39.4275 Y1.2422
 G01 X39.4482 Y1.3127
 G01 X39.4500 Y1.3214
 G01 X39.4508 Y1.3321
 G01 X39.4508 Y5.1157
 G01 X39.4505 Y5.1210
 G01 X39.4494 Y5.1281
 G01 X39.4375 Y5.1832
 G01 X39.4340 Y5.1939
 G01 X39.4299 Y5.2023
 G01 X39.4259 Y5.2086
 G01 X39.4225 Y5.2131
 G01 X39.3743 Y5.2687
 G01 X39.3662 Y5.2764
 G01 X39.3586 Y5.2818
 G01 X39.3504 Y5.2862
 G01 X39.3418 Y5.2896
 G01 X39.2729 Y5.3099
 G01 X39.2625 Y5.3121
 G01 X39.2518 Y5.3129
 G01 X33.6366 Y5.3129
 G01 X33.5030 Y5.3487
 G01 X33.3831 Y5.4179
 G01 X30.7237 Y8.0773
 G01 X30.6956 Y8.1002